

**UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS**

**FACULTAD DE QUÍMICA E INGENIERÍA QUÍMICA**

**E.A.P. DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**Biolixiviación del cobre en minerales sulfurados  
refractarios como proceso preliminar para la  
lixiviación de oro por cianuración**

**TESIS**

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Químico

**AUTOR**

Luis Alfredo Ramírez Oscco

**ASESORES**

Manuel Otiniano Cáceres

Vladimir Arias Arce

Lima - Perú

2015

### **Dedicatoria**

A mis abnegados padres Nelly y Luis,

A mis hermanos Mauricio y Lorena,

Y a mi mamá losa.

## **Agradecimientos**

Un profundo agradecimiento a la E.A.P de Ingeniería Metalúrgica por el apoyo brindado, al Ing. Vladimir Arias Arce ,a cargo del laboratorio de Biometalúrgia, y al Ing. Manuel Otiniano Cáceres, por la confianza y el tiempo dedicado en el asesoramiento hacia el proyecto, al Ing. Fernando Anaya por el asesoramiento en los análisis químicos.

Al equipo del laboratorio de Microbiología ambiental de la Facultad de Biología, dirigido por el Dr. Abad Flores quien nos brindó las instalaciones y equipos durante la realización del proyecto.

Al laboratorio de Microscopia de la E.A.P de Ingeniería Geológica por los análisis brindados en el área de Mineralogía.

También un fraterno agradecimiento a mi gran amigo Luis Salcedo, por los consejos biológicos brindados, a mi amigo Hans Cayo por el apoyo y compañía en el proyecto, como también a mis amigos Juan, Yesenia Yucra y Luis Gutiérrez de la empresa Minera Paraiso SAC , por el consejo y apoyo en las pruebas de cianuración y soporte en las gestiones de la muestra de mineral trabajado.

En términos familiares, a mi gran familia Ramírez Roca en especial a mi tía Zoila y familia, por el apoyo brindado en todos estos años, gracias.

Finalmente a mis amigos y Profesores de la UNMSM que de una u otra manera han formado parte en la realización del presente trabajo.

---

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se han desarrollado pruebas de biolixiviación aplicada hacia minerales sulfurados refractarios de cobre mediante cepas bacterianas aisladas de drenajes ácidos de mina, para el cual se ha realizado durante tres etapas consecutivas:

En la primera etapa (adaptación) se ha realizado a una densidad de pulpa de 1%(W/V) logrando una recuperación óptima de Cobre de 68% y 25.6% a 6g/l y 9g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  para el mineral S y K respectivamente durante 24 días.

En la segunda etapa, realizado a una densidad de pulpa de 2%(W/V), la recuperación máxima de cobre se logro en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , ya que se ha realizado con bacterias adaptadas en la primera etapa. La recuperación máxima de cobre en mencionada etapa ha sido de 85% y 26% para el mineral S y K respectivamente, e incrementándose la densidad biológica en 13% y 110% para el mineral S y K en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

En la tercera etapa, realizada a una densidad e pulpa de 6%(W/V) y con inóculo procedente de la segunda etapa, se ha logrado obtener la recuperación máxima de cobre de 89% en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  e incrementándose la densidad biológica en 42 % respecto al inóculo para el mineral S, respecto al mineral K , se ha logrado la recuperación máxima de cobre de 33% e incrementándose la densidad biológica en 17% en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  respecto a la segunda etapa.

En la lixiviación química a 2%(W/V) de densidad de pulpa durante 24 días se ha logrado obtener una recuperación de cobre de solo 4% y 1.4% para el minera S y K respectivamente, mientras por biolixiviación, a las mismas condiciones de tiempo y densidad e pulpa, se ha obtenido 85% y 27.31% de recuperación de cobre para el mineral S y K respectivamente.

---

---

El proceso de Cianuración se ha realizado a la muestra biolixiviada de la tercera etapa en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , por el cual cuantificar el porcentaje de recuperación de oro respecto a muestras sin tratamiento biológico, valida la oxidación y liberación del oro encapsulado observado en las micrografías realizadas, los logros obtenidos son los siguientes:

Mineral	Ahorro en consumo de Cianuro	Incremento en la Recuperación de Oro.
Mineral S	16.96 %	6.7 %
Mineral K	7.86 %	4.27 %

---

## **INDICE**

<b>1.</b>	<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
1.1	Planteamiento del Problema.....	4
1.1.2	Justificación del problema.....	4
1.2	Hipótesis.....	5
1.2.1	Objetivo General.....	5
1.2.2	Objetivos Específicos.....	5
1.3	Antecedentes.....	6
1.3.1	Biolixiviación en el Perú.....	7
1.3.1.1	Proyecto de Tamboraque.....	8
1.3.1.2	Descripción del Proceso.....	8
<b>2</b>	<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>10</b>
2.4	Microorganismos implicados en los procesos de Biolixiviación.....	11
2.4.1	Fuentes de Energía.....	12
2.4.1.1	Oxidación del Hierro.....	12
2.4.1.2	El azufre como fuente de energía.....	13
2.5	Mecanismos de Biolixiviación.....	13
2.5.1	Mecanismo Directo.....	14
2.5.2	Mecanismo Indirecto.....	15
2.5.2.1	Mecanismos Indirectos.....	17
2.6	Parámetros que afectan la biolixiviación.....	19
2.6.1	Tipo de Material.....	20
2.6.2	Aireación.....	20
2.6.3	Irrigación.....	21
2.6.4	Potencial Redox (Eh).....	21
2.6.5	PH.....	22
2.6.6	Temperatura.....	22
2.6.7	Densidad de pulpa.....	23
2.6.8	Sustrato de mineral.....	23
2.6.9	Otros factores.....	24
2.6.10	Inhibidores de la biolixiviación.....	24
2.7	Lixiviación Química.....	25
2.7.1	Agentes Lixiviantes.....	25
2.7.2	Variables del Proceso de lixiviación.....	27
2.7.2.1	Granulometría.....	27
2.7.2.2	Tiempo de lixiviación.....	28
2.7.2.3	Especies mineralógicas de la ganga.....	28
2.8	Proceso de Cianuración.....	29
2.8.1	Factores que afectan la cianuración.....	29
2.8.1.1	Efecto de Pre-tratamiento.....	29
2.8.1.2	Efecto de la Agitación.....	30
2.8.1.3	Efecto de la concentración de cianuro.....	30

---

---

2.8.1.4	Efecto del PH.....	30
2.8.1.5	Efecto del Tamaño de Partícula.....	31
2.8.1.6	Efecto de la densidad de la suspensión.....	31
2.9	Ventajas y desventajas de la biolixiviación.....	32
2.9.1	Ventajas.....	32
2.9.2	Desventajas.....	33
<b>3.</b>	<b>MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>34</b>
3.1	Laboratorios de experimentación.....	35
3.2	Equipos de prueba.....	35
3.3	Reactivos.....	36
3.4	Variables.....	36
3.4.1	Variables Independientes.....	36
3.4.2	Variables Dependientes.....	36
3.5	Plan de trabajo.....	37
3.6	Determinación de la densidad biológica.....	39
3.7	Análisis de los minerales.....	40
3.7.1	Mineral S .....	40
3.7.2	Mineral K.....	41
3.7.3	Análisis granulométrico para el mineral S y K.....	41
3.7.3.1	Análisis granulométrico del mineral S.....	42
3.7.3.2	Análisis granulométrico del mineral K.....	42
3.8	Mineralurgia de los minerales S y K.....	42
3.8.1	Caracterización mineralógica al mineral S.....	43
3.8.1.1	Grados de liberación.....	43
3.8.1.2	Micrografías del mineral S.....	44
3.8.2	Caracterización mineralógica al mineral K.....	45
3.8.2.1	Grados de liberación.....	46
3.8.2.2	Micrografías del mineral K.....	47
<b>4.</b>	<b>PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>48</b>
4.1	Pruebas de Biolixiviación.....	49
4.1.1	Primera Etapa de Biolixiviación.....	50
4.1.1.1	Parámetros medidos para el Mineral S.....	51
4.1.1.1.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico... 51	
4.1.1.1.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP .....	52
4.1.1.1.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	53
4.1.1.1.4	Concentración de hierro total (Fe).....	54
4.1.1.2	Parámetros medidos para el Mineral K.....	55
4.1.1.2.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.. 55	
4.1.1.2.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.....	56
4.1.1.2.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	57
4.1.1.2.4	Concentración de hierro total (Fe). ....	58
4.1.2	Segunda Etapa de Biolixiviación.....	59

---

---

4.1.2.1	Parámetros medidos para el Mineral S.....	59
4.1.2.1.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.....	60
4.1.2.1.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP .....	60
4.1.2.1.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	62
4.1.2.1.4	Concentración de hierro total (Fe).....	62
4.1.2.2	Parámetros medidos para el mineral K.....	63
4.1.2.2.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.....	63
4.1.2.2.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP .....	65
4.1.2.2.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	65
4.1.2.2.4	Concentración de Hierro Total (Fe).....	66
4.1.3	Tercera Etapa de Biolixiviación.....	67
4.1.3.1	Parámetros medidos para el Mineral S.....	67
4.1.3.1.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.....	68
4.1.3.1.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.....	69
4.1.3.1.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	70
4.1.3.1.4	Concentración de hierro total (Fe).....	71
4.1.3.2	Parámetros medidos para el mineral K.....	71
4.1.3.2.1	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.....	72
4.1.3.2.2	Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP .....	72
4.1.3.2.3	Recuperación de Cobre (Cu).....	74
4.1.3.2.4	Concentración de hierro total (Fe).....	74
4.2	Mineralogía del mineral Biolixiviado .....	75
4.2.1	Mineralogía al relave de la primera etapa del mineral K a 0g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	76
4.2.1.1	Micrografías del relave del mineral K perteneciente a la 1ª etapa a 0g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	77
4.2.2	Mineralogía al relave de la primera etapa del mineral K a 3g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	78
4.2.2.1	Micrografías del relave del mineral K perteneciente a la 1ª etapa a 3g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	79
4.3	Disolución de arsénico(As), hierro (Fe) y azufre(S).....	80
4.4	Efecto de la concentración de pulpa.....	81
4.4.1	Crecimiento biológico.....	81
4.4.2	Recuperación de cobre.....	81
4.5	Proceso de Cianuración.....	83
4.5.1	Procedimiento.....	84
4.5.2	Criterios durante las pruebas de cianuración.....	85
4.5.2.1	Concentración de cianuro constante.....	85
4.5.2.2	Volumen contante durante la prueba de cianuración.....	86
4.5.2.3	Agregado de Cal.....	86
4.5.2	Recuperación de Oro (Au) para los minerales S y K.....	87
5.	<b>DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....</b>	<b>86</b>
6.	<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>90</b>

---



---

<b>7.</b>	<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>93</b>
<b>8.</b>	<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>95</b>
<b>9.</b>	<b>ANEXO.....</b>	<b>103</b>

## **ÍNDICE DE TABLAS**

<b>Tabla 1.1</b>	Producción de Cobre por Biolixiviación en Chile. ....	7
<b>Tabla 1.2</b>	Operación de Biolixiviación y Biooxidación en el Perú.....	7
<b>Tabla 1.3</b>	Parámetros de Proceso en tamboraque.....	8
<b>Tabla 2.1.</b>	Factores y parámetros que afectan la biolixiviación de pilas y la recuperación del metal. ....	20
<b>Tabla 2.2</b>	Velocidad de disolución de las principales especies de cobre al lixiviarse en una solución diluida de ácido sulfúrico.....	27
<b>Tabla 3.1</b>	Composición química del mineral S.....	41
<b>Tabla 3.2</b>	Composición química del mineral K.....	41
<b>Tabla 3.3</b>	Mineralogía del mineral S.....	43
<b>Tabla 3.4</b>	Mineralogía del mineral K.....	45
<b>Tabla 4.1</b>	Mineralogía al relave de la 1ª etapa de biolixiviación al mineral K a 0g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	76
<b>Tabla 4.2</b>	Mineralogía al relave de la 1ª etapa de biolixiviación al mineral K a 3g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	78
<b>Tabla 4.3</b>	Porcentaje de disolución de As, Fe y S para el mineral K durante las 3 etapas.....	80
<b>Tabla 4.4</b>	Porcentaje de disolución de As, Fe y S para la mineral S durante las 3 etapas.....	80
<b>Tabla 4.5</b>	Cantidad de cal para el acondicionamiento de las muestras a PH 10.6...	84
<b>Tabla 4.6</b>	Consumo total de Cianuro. ....	86

---

---

## **ÍNDICE DE FIGURAS**

<b>Figura 2.1</b>	Mecanismos directo e indirecto de biolixiviación.....	14
<b>Figura 2.2</b>	Las funciones microbianas en la biolixiviación de minerales de sulfuro. Mecanismo indirecto y directo.....	16
<b>Figura 2.3</b>	Mecanismos indirectos en la biolixiviación de sulfuros Af = A. ferrooxidans; Lf = L. ferrooxidans; At = A. thiooxidans.....	19
<b>Figura 2.4</b>	Efecto del pH en la extracción de oro. Condición : 20% sólido, 0,6 MPa, 300 min <sup>-1</sup> , 80 ° C, 1% NaCN, 1 h.....	26
<b>Figura 3.1</b>	Plan del procedimiento experimental.....	38
<b>Figura 3.2</b>	1,2,3 Microscopio biológico binocular utilizado en el recuento Biológico .4,5 Microscopio Binocular Marca “LEICA” con software para la captura de imágenes.....	40
<b>Figura 3.3</b>	Imágenes capturadas mediante el microscopio biológico para las muestras del mineral S y K.....	40
<b>Figura 3.4</b>	Distribución granulométrica para el mineral S.....	42
<b>Figura 3.5</b>	Distribución granulométrica para el mineral K.....	42
<b>Figura 4.1</b>	Inicios de la Primera etapa de biolixiviación del mineral S, a diferentes concentraciones de FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O.....	51
<b>Figura 4.2</b>	Inicios de la Primera etapa de biolixiviación del mineral K, a diferentes concentraciones de FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O.....	51
<b>Figura 4.3</b>	Crecimiento biológico durante la primera etapa para el mineral S.....	51
<b>Figura 4.4</b>	Efecto del PH durante la primera etapa para el mineral S.....	52
<b>Figura 4.5</b>	Efecto del ORP durante la primera etapa para el mineral S.....	53
<b>Figura 4.6</b>	Porcentaje de recuperación de cobre durante la primera etapa para el mineral S.....	54
<b>Figura 4.7</b>	Concentración de Hierro Total (Fe) durante la primera etapa para el mineral S.....	54
<b>Figura 4.8</b>	Crecimiento biológico durante la primera etapa para el mineral K.....	55
<b>Figura 4.9</b>	Efecto del PH durante la primera etapa para el mineral K.....	56

---

---

<b>Figura 4.10</b>	Efecto del ORP durante la primera etapa para el mineral K.....	57
<b>Figura 4.11</b>	Porcentaje de recuperación de cobre durante la primera etapa para el mineral K.....	57
<b>Figura 4.12</b>	Concentración de Hierro Total (Fe) durante la primera etapa para el mineral K.....	58
<b>Figura 4.13</b>	Inicios de la segunda etapa de biolixiviación del mineral S, a diferentes concentraciones de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	59
<b>Figura 4.14</b>	Inicios de la segunda etapa de biolixiviación del mineral K, a diferentes concentraciones de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	59
<b>Figura 4.15</b>	Crecimiento biológico durante la segunda etapa para el mineral S.....	60
<b>Figura 4.16</b>	Efecto del PH durante la segunda etapa para el mineral S.....	60
<b>Figura 4.17</b>	Efecto del ORP durante la segunda etapa para el mineral S.....	61
<b>Figura 4.18</b>	Porcentaje de recuperación de cobre durante la segunda etapa para el mineral S.....	62
<b>Figura 4.19</b>	Concentración de Hierro Total (Fe) durante la segunda etapa para el mineral S.....	62
<b>Figura 4.20</b>	Crecimiento biológico durante la segunda etapa para el mineral K...	63
<b>Figura 4.21</b>	Efecto del PH durante la segunda etapa para el mineral K.....	64
<b>Figura 4.22</b>	Efecto del ORP durante la segunda etapa para el mineral K.....	65
<b>Figura 4.23</b>	Porcentaje de recuperación de cobre durante la segunda etapa para el mineral K.....	65
<b>Figura 4.24</b>	Concentración de Hierro Total (Fe) durante la segunda etapa para el mineral K.....	66
<b>Figura 4.25</b>	Crecimiento biológico durante la tercera etapa para el mineral S.....	68
<b>Figura 4.26</b>	Efecto del PH durante la tercera etapa para el mineral S.....	69
<b>Figura 4.27</b>	Efecto del ORP durante la tercera etapa para el mineral S.....	69
<b>Figura 4.28</b>	Porcentaje de recuperación de cobre durante la tercera etapa para el mineral S.....	70
<b>Figura 4.29</b>	Concentración de Hierro Total (Fe) durante la tercera etapa	

---

---

para el mineral S.....	71
<b>Figura 4.30</b> Crecimiento biológico durante la tercera etapa para el mineral K.....	72
<b>Figura 4.31</b> Efecto del PH durante la tercera etapa para el mineral K.....	72
<b>Figura 4.32</b> Efecto del ORP durante la tercera etapa para el mineral K.....	73
<b>Figura 4.33</b> Porcentaje de recuperación de cobre durante la tercera etapa para el mineral K.....	74
<b>Figura 4.34</b> Concentración de Hierro Total (Fe) durante la tercera etapa para el mineral K.....	74
<b>Figura 4.35</b> A- muestra del mineral K en láminas delgadas para estudio microscópico. B, D y C - vistas de las secciones pulidas para el mineral K para el estudio microscópico del mineral.....	75
<b>Figura 4.36</b> Crecimiento biológico en las 3 etapas de biolixiviación a 0g/l $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	81
<b>Figura 4.37</b> Recuperación de Cobre (%) en las 3 etapas de biolixiviación para el mineral S y K a 0g/l $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .....	82
<b>Figura 4.38</b> Muestra del mineral S y K después de la tercera etapa de biolixiviación.....	82
<b>Figura 4.39</b> Muestra del mineral S y K después de la tercera etapa de biolixiviación.....	83
<b>Figura 4.40</b> Procedimiento para la determinación de cianuro libre.....	86
<b>Figura 4.41</b> Comparación en porcentaje de recuperación de oro(Au) para los minerales K y S en durante la cianuración.....	87

---

**INTRODUCCION**

El desarrollo futuro con respecto a la demanda de metales y la oferta ha motivado a la investigación actual enfatizar más en los recursos metálicos como son los minerales secundarios y subproductos industriales o materiales de desecho generados a partir de diversos recursos. Las nuevas tecnologías para la producción de metal deben ser novedosas, económicas, sociales y ambientalmente viables. La recuperación de metales por el proceso biológico se ha convertido en una tecnología alternativa hoy en día especialmente en metales como el oro y cobre, ya que actualmente a nivel mundial las reservas de minerales con alto grado de metales comerciables o leyes altas están disminuyendo a una velocidad considerable mientras se incrementa la demanda de dichos metales.

Como una tecnología ambientalmente benigna con amplias aplicaciones, el proceso biohidrometalúrgico se caracteriza por un bajo costo para la recuperación de metales a partir de minerales refractarios de bajo grado. Dicho Proceso ha recibido atenciones en crecimiento debido a que las normas de protección ambiental son cada vez más estrictas como es el caso de los relaves de cianuración, cuyo reactivo principal, el cianuro, es altamente dañino. Como la aplicación del proceso de biolixiviación hacia minerales sulfurados de cobre se ha industrializado durante dos décadas, el flujo combinado de biooxidación –biolixiviación -electrodeposición ha sido utilizado con éxito en la extracción de uranio, oro, zinc y otros metales. Además, en los últimos diez años, el interés creciente se ha demostrado la biooxidación para la recuperación de cobre a partir de minerales refractarios (Wang Jun,2014).

En los últimos años, la aplicación de los métodos microbiológicos a la extracción de metales a partir de minerales sin duda ha ganado un rol prominente apoyado por los varios procesos de biolixiviación y biooxidación que operan en diferentes partes del mundo. Esta puede ser una de las razones importantes por la fundamental investigación y un nuevo potente estímulo

recibido con descubrimientos fascinantes y, además, seguramente se convertirá en la causa del desarrollo futuro en el campo (Donati. E y Sand .W. 2007).

La refractariedad puede tener su origen en fenómenos de distinta naturaleza. Al tratarse de una refractariedad física, el oro está ocluido en una matriz y el cianuro no puede acceder a él. Puede ser una refractariedad química, debida a la presencia de especies que se combinan y consumen el cianuro y el oxígeno. Puede tratarse de un fenómeno electroquímico en el que el oro se pasiva y, en consecuencia, no se disuelve. Y también a la presencia de especies carbonáceas que adsorben el oro cianurado. En todos los casos, estos minerales deben ser tratados previamente, ya sea para liberar el metal precioso encapsulado y permitir así su contacto con el cianuro, o para lograr la cianuración.

Desde un punto de vista geológico, los depósitos del oro pueden ser clasificados en dos categorías, primarios y secundarios. El oro en depósitos secundarios resulta de la erosión de estructuras de rocas que contienen oro, el cual es transportado por corrientes fluviales y depositado en yacimientos llamados placeres. Este oro es usualmente nativo y libre, por lo cual puede ser recuperado fácilmente por cianuración convencional. En los depósitos primarios (hidrotermales), el oro se encuentra diseminado al interior de la pirita, calcopirita, arsenopirita etc. Usualmente, el oro está presente en forma submicroscópica y es extremadamente difícil extraerlo por cianuración convencional, aun aplicando moliendas finas (Weir y Berezowsky, 1984; Demopoulos y Papangelakis, 1987; Chen y col., 2002; Chrysoulis y McMullen, 2005). Debido al agotamiento de los depósitos secundarios, se presenta la necesidad de procesar los minerales de los depósitos primarios, los cuales son refractarios.

### 1.1 Planteamiento del Problema.

La Naturaleza refractaria de las especies minerales sulfurados como son: La Calcopirita( $\text{CuFeS}_2$ ), Pirita( $\text{FeS}_2$ ), Arsenopirita( $\text{AsFeS}_2$ ). Requiere el uso de operaciones convencionales como la Pirometalurgia para su posterior recuperación del metal valioso (ejemplo, el cobre), elevando los costos operaciones y emitiendo gases contaminantes.

Actualmente la lixiviación de pilas es aproximadamente el 20% de la producción de cobre en todo el mundo (Padilla 2008) y se estima que alrededor de un quinto del cobre producido en el mundo puede ser tratado mediante la biolixiviación, también para minerales refractarios como pre tratamiento (Huang ,2014).

La naturaleza refractaria de las mencionadas especies mineralógicas, incluye la oclusión o encapsulamiento del oro en dichas especies, en consecuencia limita la recuperación del metal valioso o fuerza al uso de procesos con alto costo energético y operacional ( Proceso NITROX, Oxidación a presión, etc.) ,mediante el proceso de Cianuración, la recuperación de oro en menas refractarias es menor al 60% mientras en menas con presencia de oro libre la recuperación está entre 90-96% (Nieves,1994).

El procesos de biooxidación en minerales sulfurados refractarios reduce el consumo de cianuro y mejora la recuperación de oro (S. Mxinwa,2012)

El incremento de la reservas mineralógicas con características sulfuradas, obliga el uso de tecnologías no convencionales para su tratamiento y recuperación de los metales valiosos (Brierley ,2008).

#### 1.1.2 Justificación del problema.

El efecto contaminante del uso de tecnologías convencionales en la industria minera, obliga la necesidad de uso de tecnologías ambientalmente amigable y de bajos costos operacionales.



En la recuperación del oro en minerales refractarios sulfurados respecto a minerales con tenores de oro libre, fuerza al uso de mayor cantidad de reactivos (Cianuro) para mantener una recuperación económicamente viable es por el cual se opta por nuevas tecnología que permita reducir el consumo de dichos reactivo.

### **1.2 Hipótesis.**

Es posible la disolución de cobre y liberación del oro de minerales sulfurados refractarios mediante la biolixiviación con cepas bacterianas aisladas de efluentes ácidos provenientes de cuerpos mineralizados sulfurados.

#### **1.2.1 Objetivo General.**

Evaluar la lixiviación de Au mediante el proceso de cianuración empleando la biolixiviación de minerales sulfurados con tenores de cobre y oro mediante las cepas bacterianas aisladas de cuerpos mineralizados sulfurados como tratamiento preliminar.

#### **1.2.2 Objetivos Específicos.**

Evaluar la adaptación biológica y recuperación de cobre biolixivado variando la concentración del sustrato  $\text{Fe}^{2+}$ .

Determinar el efecto que tiene la variación de sustrato ( $\text{Fe}^{2+}$ ) en los parámetros fisicoquímicos de PH ,ORP(mV) en el proceso de biolixiviación.

Evaluar el grado de disolución de especies mineralógicas como el hierro (Fe), Arsénico(As) y Azufre(S) mediante el proceso de Biolixiviación.

Evaluar el grado de liberación del oro contenido en los sulfuros refractarios empleando la biolixiviación como tratamiento preliminar en la lixiviación por cianuración.

### 1.3 Antecedentes.

La Biominería es la utilización de biohidrometalurgia para procesar minerales metálicos y La Biohidrometalurgia es esencialmente la aplicación de la biotecnología para el procesamiento de minerales. La biominería puede subdividirse en operaciones de biolixiviación y Biooxidación, la biolixiviación implica la solubilización de un sulfuro de metal insoluble a un metal soluble, que puede ser recuperado del lixiviado. La Biooxidación utiliza la oxidación mineral, pero en este caso el metal objetivo permanece en una fase insoluble La Biooxidación se utiliza a menudo en el pre-tratamiento de concentrados de oro, antes de la extracción con cianuro convencional. Sin embargo, la aplicación moderna de biominería sólo se inició en la década de 1960 con la construcción y el riego de los vertederos para la recuperación de cobre en la mina Kennecott Bingham Canyon Copper, Utah, USA (Brierley 2001).

En 1947 cuando *T. ferrooxidans* se aisló por primera vez del drenaje de una mina de carbón bituminoso.

En España en 1950 se reportó la lixiviación de minerales de cobre en una mina del Río Tinto, hasta 1970 se confirmó que esto fue derivado de la actividad de *Thiobacillus* (Lindstrom 1993;). Cuando la microbiología avanzó, se reportó que *Thiobacillus* como es clave en la recuperación de metales de valor comercial a partir de minerales sulfurados refractarios.

En 1992 desde la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro, el concepto de tecnologías de desarrollo sostenible se ha convertido en los procedimientos de extracción Biohidrometalurgia muy populares, ya que son "casi sin excepción más Amigable con el medio ambiente"

En los últimos años los factores que afectan la producción de metales a nivel mundial son:

- 1) La demanda de diversos productos básicos de metal, en gran parte impulsado por la industrialización y la urbanización de China.
- 2) El descubrimiento de depósitos de mineral que son más difíciles explotar.
- 3) Procesos largos y difíciles para permisos respecto a estudios ambientales.

## INTRODUCCIÓN

- 4) los costos de capital más altos, que son, en parte, debido a la aumento del costo de acero.
- 5) Los elevados costos operativos, debido a la creciente costos de la energía.
- 6) Retos tecnológicos, estos factores impulsan la necesidad de la innovación en la biominería en particular (Brierley , 2008).

**Tabla 1.1** Producción de Cobre por Biolixiviación en Chile (Demergasso, C., 2009).

Operación	Producción (TM/año2008)	Operador	Grado Cobre	Duración del Proceso
Quebrada Blanca	82.000	Teck	0.3	1994-Presente
Codelco- Chuquicamata	85.000	CODELCO	0.3	1994-Presente
Andacollo 22.500	22.500	Teck	0.58	1996-Presente
Dos Amigos	10.000	Cemin	2.5	1996-Presente
Los Bronces	46.400	Anglo American	0.45	2006-Presente
Minera Escondida	182.000	BHP Billiton	0.3 - 0.7	2006-Presente
Minera Spence	128.000	BHP Billiton	1.12	2007-Presente
Tota Producción por Biolixiviación	555.900			
% Biolixiviación / Producción Total	10,4			

### 1.3.1 Biolixiviación en el Perú.

**Tabla 1.2** Operación de Biolixiviación y Biooxidacion en Perú (Brierley, 2010).

Planta Industrial y localización	Capacidad de Concentración	Años de Operación	Operación y Tecnología
Tamboraque, san Mateo,	60 (TM/Dia)	1998-2003	Gold field's BIOX®
Cerro Verde	54200 TM de Cátodos de Cobre /Año	1997-Presente	Biolixiviaicion

La biotecnología aplicada a la minería, actualmente no está muy difundida en el Perú, es por el cual los pocos proyectos implementados. En la actualidad desarrollos en la implementación de pruebas de biolixiviación como son el proyecto Yanacocha Verde y otros proyectos de investigación en desarrollo.

### 1.3.1.1 Proyecto de Tamboraque.

La mina Coricancha se encuentra en el Distrito Minero Viso-Aruri, a una altitud de 4000 m.s.n.m, y la planta Tamboraque, a una altitud de 3000 m.s.n.m. La planta está ubicada a unos 90 km al este de la ciudad de Lima en la carretera central, unos pocos kilómetros de la localidad de San Mateo. Gold Field presenta un proceso detallado de diseño para la planta Tamboraque BIOX®. La planta tenía una capacidad de diseño de 60 ton / día de concentrado con leyes de 22-30% As; 30-34% de Fe; 21,8 a 31,1 g / ton Au; 49,8 a 62,2 g/t Ag y 24-30% S<sup>2-</sup>. El diseño se basó en datos recogidos de la prueba de planta piloto.

El concentrado de pirita, con leyes de 1,8 a 2% As, 44-46% de Fe, 4.6 a 5.5 g/t Au, 133 g/t Ag y 7-9% S<sup>2-</sup> va a la instalación de relaves junto con la salida de relaves, colas de cianuración y residuos de neutralización. Los parámetros del proceso (Martha, 2006).

**Tabla 1.3 Parámetros de Proceso en Tamboraque (Martha, 2006)**

<b>PH</b>	1.2-1.8
<b>Concentración de OD</b>	2 ppm mínimo
<b>Concentración de sólidos</b>	20% en masa
<b>Tiempo de retención BIOX®</b>	4-5 Días
<b>Temperatura</b>	40-45°C

### 1.3.1.2 Descripción del Proceso.

El mineral de la mina Coricancha es previamente tratada a razón de 200 ton / día para producir concentrados de plomo y zinc. Las colas de flotación de zinc, aún contienen 3.14 g / ton de oro y 33.9 g / t de plata, fue depositado en Presas de relaves 1 y 2 para su posterior procesamiento en una posterior etapa.

## INTRODUCCIÓN

---

El objetivo del proyecto de Tamboraque era aumentar la capacidad de molienda de la planta a 600 ton / día y al mismo tiempo para construir instalaciones para recuperar oro y plata de la arsenopirita. El proyecto fue programado para ser ejecutado en dos fases. Durante la fase 1 un estimado de 19.000 oz de oro y 28.000 onzas de plata fue para ser recuperados de las 260.000 toneladas de relaves aurífero depositados previamente en tranques de relaves 1 y 2.

Esta fase incluye la construcción del incremento en la capacidad de flotación, así como el proceso BIOX® en plantas convencionales de CIL en la recuperación del oro ( Dew 1995).

La segunda fase del proyecto fue la expansión de la actual planta de tratamiento de 600 toneladas / día de mineral fresco de la mina para producir los concentrados de plomo y zinc. Se producirían concentrados de pirita y arsenopirita a partir de las colas de flotación de zinc.

**MARCO TEÓRICO**

### 2.4 Microorganismos implicados en los procesos de Biolixiviación.

*Acidithiobacillus ferrooxidans* (A. ferrooxidans) y *thiooxidans Acidithiobacillus* (A. thiooxidans) son considerados los microorganismos más importantes en la disolución bacteriana de sulfuros metálicos (biolixiviación). Estas dos especies de *Acidithiobacillus* son gram-negativa, aerobia y organismos quimioautotróficos. Se desarrollan a temperatura ambiente (bacterias mesófilas) y son comunes en ambientes ácidos contaminados. Ambas bacterias son capaces de crecer utilizando la energía obtenida a partir de compuestos reducidos de azufre. A. ferrooxidans también es capaz de oxidar el hierro (II) utilizando oxígeno como último aceptor de electrones (Barrett et al., 1993; Rawlings, 1997).

A. thiooxidans comparte características morfológicas con A. ferrooxidans. Este autótrofo deriva energía de la oxidación de compuestos solubles de azufre pero no puede oxidar el hierro ferroso y minerales de sulfuro refractarios, tales como pirita y calcopirita (Kuenen et al., 1992). Sin embargo, en cultivos mixtos con A. ferrooxidans, A. thiooxidans generalmente aumenta la oxidación de minerales de sulfuro (Groudev, 1983; Lizame y Suzuki, 1989). Los cultivos mixtos que comprenden A. thiooxidans y A. ferrooxidans presentan oxidación muy eficiente no sólo de la pirita, sino también de calcopirita y otros minerales de sulfuro. El papel de la A. thiooxidans en estos procesos es eliminar las películas de pasivación del azufre que se forman en superficies de las partículas de mineral durante la lixiviación. A. thiooxidans pueden crecer a valores de pH más bajos (por debajo de pH 0,5) que cualquier otra especie de microbios conocidos. (Groudev, 1990)

En general, los tipos de microorganismos que se encuentran en los procesos de lixiviación en pila son similares a los encontrados en los procesos de tanque agitado, sin embargo, las proporciones de los microbios pueden variar

dependiendo del mineral y las condiciones en las que se desarrollan los montones o tanques. En los procesos que operan desde a temperatura ambiente a aproximadamente 40 ° C, los microorganismos más importantes son consideradas como un consorcio de bacterias Gram-negativas. Estos son oxidantes de hierro y del azufre *Acidithiobacillus ferrooxidans* (previamente *Thiobacillus ferrooxidans*), los thiooxidans, oxidantes del azufre *Acidithiobacillus* (anteriormente *Thiobacillus thiooxidans*) y *Acidithiobacillus caldus* (anteriormente *Thiobacillus caldus*), y el leptospirilli hierro oxidante, *Leptospirillum ferrooxidans* y *Leptospirillum ferriphilum* (Coram, 2002; Foucher, 2003; Goebel, 1994; Hallberg, 1994; Vásquez, 1997).

### 2.4.1 Fuentes de Energía.

La solubilización de minerales es considerado como un proceso químico que resulta de la acción de hierro férrico y / o el la acción acida, típicamente ácido sulfúrico. Por lo tanto, independientemente de las temperaturas a las que crecen, los microorganismos que desempeñan el papel principal de la lixiviación del metal a partir de minerales son organismos oxidantes de hierro y azufre. El hierro y el azufre sirven como donantes de electrones durante la respiración (Douglas, 2005).

#### 2.4.1.1 Oxidación del Hierro.

El hierro ferroso se oxida fácilmente a hierro férrico y de esta manera puede servir como un donador de electrones. El par redox de  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  tiene un potencial de electrodo estándar muy positivo (770 mV a pH 2). Como resultado, solo el oxígeno es capaz de actuar como un aceptor de electrones natural y en presencia de protones siendo el producto de la reacción el agua ( $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$  820 mV a pH 7).

Sin embargo, bajo condiciones aeróbicas, el hierro ferroso se oxida espontáneamente a hierro férrico a menos que el pH es bajo. Por lo tanto, las bacterias acidófilas extremadamente son capaces de utilizar el hierro ferroso

---



como un donador de electrones de manera que no es posible para las bacterias que crecen a pH neutro. Debido a que la diferencia en el potencial redox entre el  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$  y pares redox  $\text{O}_2 / \text{H}_2\text{O}$  es pequeño y porque sólo un mol de electrones es liberado por mol de hierro oxidado, grandes cantidades de hierro ferroso necesitan ser oxidado para producir relativamente poca masa celular. Estas grandes cantidades de hierro no son transportadas a través de la membrana celular, pero permanecen fuera de la célula y cada átomo de hierro ferroso simplemente entrega su electrón a un soporte situado en la envoltura celular (Douglas, 2005).

### **2.4.1.2 El azufre como fuente de energía.**

El ácido es el responsable de valores bajos de pH, el ambiente donde se encuentran los acidófilos extremos es más a menudo en medio de ácido sulfúrico. Este ácido sulfúrico es producido por la oxidación de RISCs (reducción de compuestos de azufre inorgánicos). Para que se produzca la oxidación biológica, los RISCs sirven como un donador de electrones con el oxígeno que actúa como el aceptor de electrones energéticamente más favorable. La cantidad potencial de la energía que se puede hacer disponible cuando un átomo de azufre a partir de un mineral de sulfuro se oxida a sulfato es mucho mayor que cuando el hierro es oxidado. Naturalmente los RISCs están presentes allí donde los minerales contienen sulfuros y están expuestos a la superficie. Una variedad de RISCs se liberan como resultado de la reacción química de minerales sulfurados con agua. (Schippers, 1999).

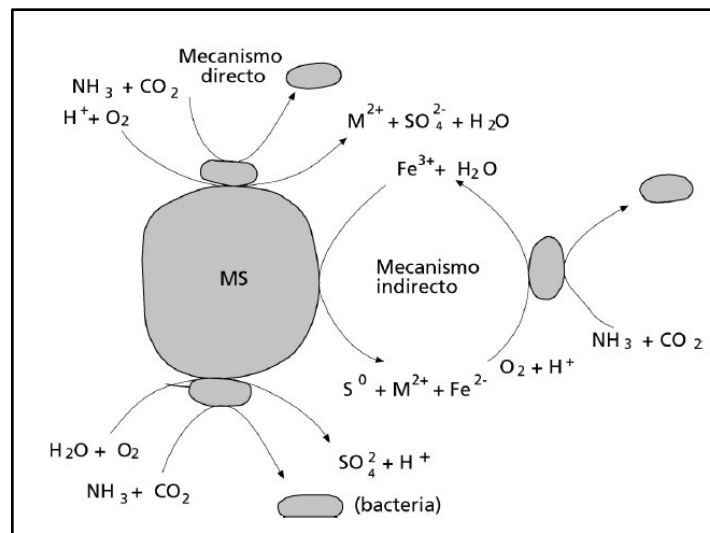
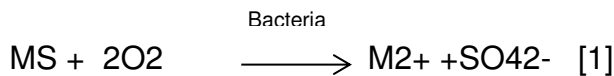
## **2.5 Mecanismos de Biolixiviación.**

Existen mecanismos que tratan de explicar el Proceso químico- Biológico de la biolixiviación, siendo así el mecanismo Directo e Indirecto o ambos simultáneamente.

### 2.5.1 Mecanismo Directo.

Según el primero de los posibles mecanismos, la bacteria ataca al sulfuro metálico de forma directa, mediante su adherencia a la superficie mineral y la posterior oxidación enzimática de éste por transporte de electrones desde la parte reducida del mineral, generalmente un sulfuro, al oxígeno disuelto.

La reacción general sería:



**Figura 2.1 Mecanismos directo e indirecto de biolixiviación; según Rodríguez Y. 2000.**

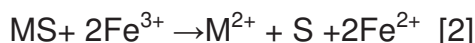
La adherencia de bacterias al mineral es, por tanto, un requisito del mecanismo directo y la principal evidencia presentada en defensa del mismo. Esta teoría ha sido apoyada por distintos estudios experimentales que confirman la adhesión de las bacterias biolixivantes a la superficie de los minerales( Acevedo . 2005).

La adsorción de células a las partículas minerales suspendidas se lleva a cabo en cuestión de minutos a horas. Este se ha demostrado utilizando radiactivamente células marcadas de *Thiobacillus ferrooxidans* en crecimiento  $\text{NaHCO}_3$  o la capacidad oxidativa de bacterias adheridas a la superficie del

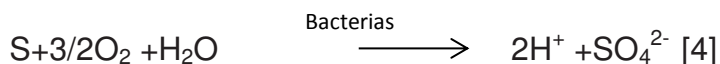
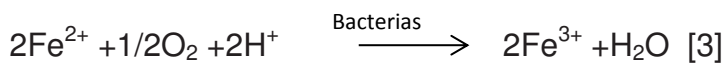
mineral. Las células se adhieren selectivamente a las superficies minerales que ocupan preferentemente irregularidades de la estructura de la superficie. Adicionalmente, un comportamiento quimiotáctico de cobre, hierro y iones de níquel se han demostrado con estudios que detectan genes implicados en la quimiotaxis en *Thiobacillus ferrooxidans* y *Thiobacillus thiooxidans* (Brandl 2001).

### 2.5.2 Mecanismo Indirecto.

En contraste con el mecanismo directo, el indirecto considera básicamente la acción de los iones férricos sobre el mineral sulfurado disolviéndolo. A través de esta reacción química de lixiviación, se producen iones ferrosos y azufre elemental. Finalmente, estas especies químicas son oxidadas biológicamente a hierro férrico e ion sulfato, respectivamente. Este mecanismo, en principio, no necesita de la adherencia de las células al sulfuro mineral. Las ecuaciones que toman parte son las siguientes:

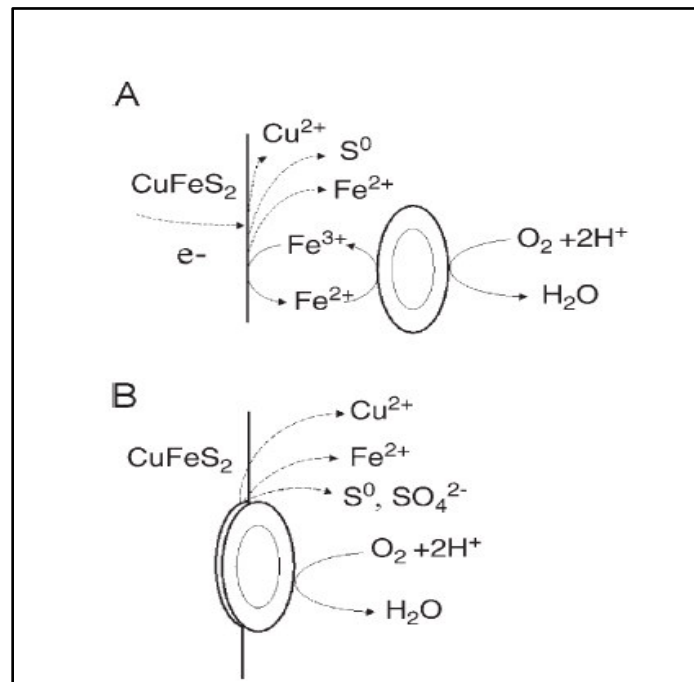


Paralelamente, la acción bacteriana cataliza la oxidación del ion ferroso y del azufre elemental según las dos reacciones siguientes:



La hipótesis de partida del modelo es que los iones férricos y/o los protones son los únicos agentes –químicos– que disuelven al sulfuro. El mecanismo es, por tanto, en sentido estricto, de naturaleza indirecta. Las bacterias tienen las funciones de: 1) regenerar los iones férricos y/o los protones; y 2) concentrarlos en la interfase mineral/agua o mineral/célula bacteriana para favorecer y aumentar la degradación del mineral. Consideran entonces que hay un factor determinante: la formación de una capa muy fina de exopolímeros, el glicocálix, con un espesor del orden de nanómetros, que rodea a las células. En esta

capa, se postula que tienen lugar los procesos químicos que llevan a la degradación del sulfuro. La catálisis del proceso en presencia de bacterias, en comparación con el proceso químico convencional, se explica por la alta concentración de agentes de lixiviación que se llega a alcanzar en la interfase citada. Además, el modelo no contempla la aparición de enzimas u otras sustancias biológicas que hasta la fecha no han sido detectadas. (Fernando A. 2005).



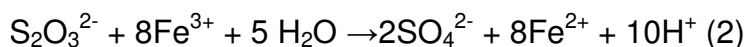
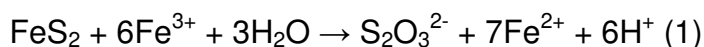
**Figura 2.2 Las funciones microbianas en la biolixiviación de minerales de sulfuro. Mecanismo indirecto (A): las bacterias oxidan el hierro soluble (II) a hierro (III) y azufre a sulfato. Los iones férricos oxidan los minerales de sulfuro en un medio ácido. Mecanismo indirecto de contacto (B): La fijación bacteriana es importante fisiológicamente, pero los iones férricos oxidan los minerales de sulfuro. Los detalles de las interacciones bacterianas (electro) químicas con las superficies minerales y / o su contacto directo (enzimática) que contribuyen a la disolución de sulfuro son desconocidos. (H.R. Watling 2006)**

Basándose en las sustancias intermedias ya detectadas dentro del mecanismo Indirecto, diferencian dos mecanismos indirectos: uno vía tiosulfato y otro vía polisulfuro, los cuales se describirán a continuación.

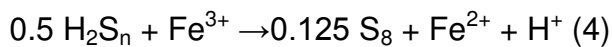
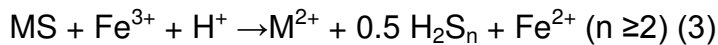
### 2.5.2.1 Mecanismos Indirectos.

Debido a recientes trabajos de *Schippers* y sus colegas ahora se sabe que hay dos diferentes mecanismos de reacción, el tiosulfato y la vía de polisulfuro, que controlan la disolución de los sulfuros metálicos. Generalmente, la lixiviación se consigue mediante una combinación de ataque de protones y los procesos de oxidación. Las dos vías se llevan a cabo en un mineral específico (*Schippers & Sand.*, 1999; *Sand et al*, 2001; *Schippers*, 2004). Sin embargo, la estructura cristalina (por ejemplo, monosulfuro o estructura disulfuro) como el criterio más obvio no determina la vía de disolución. De hecho, la solubilidad ácida de sulfuros de metal es el criterio relevante. La última propiedad se determina por la configuración electrónica (*Tributsch y Bennett*, 1981; *Schippers & Sand*, 1999; *Edelbro et al*, 2003,)

En el mecanismo de tiosulfato, la solubilización es a través de ataque hierro férrico sobre los sulfuros del metal-ácido insoluble con el tiosulfato como el principal producto intermedio, y sulfato el producto final principal. Uso de la pirita como un ejemplo de un mineral, las reacciones pueden ser representados como:



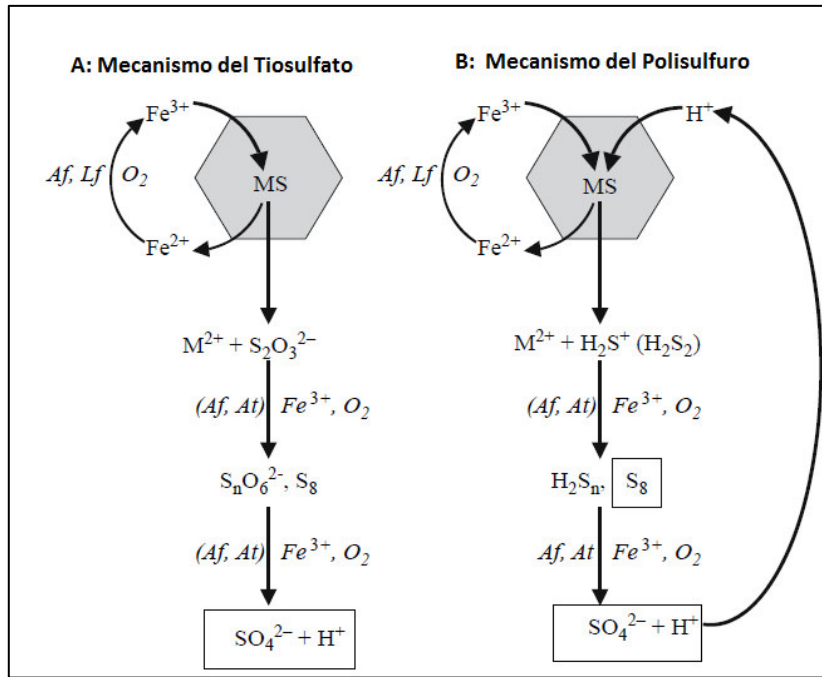
En el caso del mecanismo de polisulfuro, la solubilización del sulfuro de metal soluble en ácido es a través de un combinado ataque por el hierro férrico y los protones, con azufre elemental como el principal intermedio. Este azufre elemental es relativamente estable, pero puede estar oxidado a sulfato por microbios de azufre-oxidantes tales como thiooxidans *Acidithiobacillus* o *Acidithiobacillus caldus* (reacción de 5 ).



El hierro ferroso producido en las reacciones (1) a (4) puede ser reoxidado a hierro férrico por microorganismos de hierro-oxidantes tales como *Acidithiobacillus ferrooxidans* o bacterias de los géneros *Leptospirillum* *Sulfobacillus*.



El rol de los microorganismos en la solubilización de metales sulfurados es, por lo tanto, para proporcionar ácido sulfúrico (reacción 5) para un ataque de protones y para mantener el hierro en el estado férrico oxidado (reacción 6) para un ataque oxidativo sobre el mineral (Douglas,2005).



**Figura 2.3 Mecanismos indirectos en la biolixiviación de sulfuros. Af = A. ferrooxidans; Lf = L. ferrooxidans; At = A. thiooxidans; (Sand ,2001)**

## 2.6 Parámetros que afectan la biolixiviación.

Factores que influyen en la biolixiviación de pilas o lixiviación bacteriana, como cualquier otro proceso que implica la presencia de seres vivos, está influenciada por factores ambientales, biológicos y físico-químicos, que afectan el rendimiento de la extracción de metales (Torma, 1977; Lundgren , 1980). Óptimas condiciones de humedad, pH, temperatura, fuentes de energía y nutrientes tienen que existir junto con la ausencia de inhibidores posibles para el crecimiento de microorganismos implicados en el proceso. (N. Pradhan ,2007).

**Tabla 2.1.** Factores y parámetros que afectan la biolixiviación e pilas y la recuperación del metal ( Brandl ,2001)

<b>Factor</b>	<b>Parámetros que afectan la Biolixiviación</b>
Físicos y químicos	Temperatura, pH, potencial redox, CO <sub>2</sub> y O <sub>2</sub> Contenido , la disponibilidad de nutrientes, la disponibilidad de oxígeno, transferencia de masa homogénea, la concentración Fe (III) , la presencia de inhibidores, etc.
Biológicos	La diversidad microbiana, la densidad de población, las actividades microbianas, la tolerancia metal, distribución espacial de los microorganismos, la adaptación de microorganismos, y la concentración de inóculo.
Otros	Composición del mineral, el consumo de ácido, Granulometría del mineral, área de superficie, porosidad, interacciones hidrófobas galvánicas, y formación de minerales secundarios.

### 2.6.1 Tipo de Material

La eficacia de proceso de biolixiviación depende en gran medida de la naturaleza del material mineral (Muñoz et al., 1995) en el que existe el metal. Cuando el medio es alcalino, es probable que se formen precipitados que dificultará la percolación natural de solución de lixiviación a través de las pilas. Porosidad del material permite que la solución penetre más en el cuerpo de mineral. Otro aspecto importante de la material / mineral es proporcionar una cantidad suficiente de nutrientes para los microorganismos de crecimiento. Minerales de cuarzo y granito muestran la susceptibilidad variable para la lixiviación microbiana. (N. Pradhan ,2007).

### 2.6.2 Aireación

Como la mayoría de las bacterias de lixiviación de metales son aeróbicos y quimiolitotrófica en la naturaleza, la aireación se encarga del suministro tanto de O<sub>2</sub> y CO<sub>2</sub> al sistema de lixiviación. Suficiente dióxido de carbono en el aire sirve como una fuente de carbono necesaria para la generación de biomasa. En el



interior del montón, si no es aireado adecuadamente, es propenso a condiciones anaeróbicas. La aireación de biopilas puede acelerar las reacciones de biooxidación y reducir el tiempo de ciclo de lixiviación por el cual es muy importante el suministro de oxígeno para la viabilidad y la actividad lixivante de los microorganismos (N. Pradhan ,2007).

### **2.6.3 Irrigación**

Respecto al tipo de riego, continuo o discontinuo, hay diferentes tendencias, aunque se piensa generalmente que la irrigación discontinua favorece la disolución del metal. En tales casos, la solución de ataque se pulveriza intermitentemente sobre la superficie del montón y se permite que se filtre antes de aplicar una nueva solución, estableciendo así un efecto capilar inversa, que permite la lixiviación de mineral grueso (N. Pradhan ,2007).

### **2.6.4 Potencial Redox (Eh)**

El potencial redox de la solución es un indicador del metabolismo energético o actividad de la bacteria en el proceso de biooxidación, debido a que es una medida de la tendencia de la solución a ser oxidada o reducida. Durante la fase de crecimiento exponencial, el Eh de *A. ferrooxidans* se caracteriza por estar entre 320 – 580 mV (Rossi, 1990). Normalmente, la extracción de los sulfuros alcanza sus mayores velocidades cuando el Eh de la solución ácida ha superado los 400 – 450 mV (Acevedo y Gentina, 2005).

El efecto del potencial redox en la lixiviación de la calcopirita se ha investigado extensivamente. Recientemente Hiroyoshi et al. (1997, 2000, 2001) informaron de que la velocidad de disolución de calcopirita es mayor en los potenciales redox de las soluciones de lixiviación por debajo de un valor crítico. Desde entonces, han propuesto un método práctico para controlar el potencial redox durante la lixiviación de mineral de cobre de bajo grado (Okamoto et al., 2003).

### 2.6.5 PH

El ajuste del valor de pH correcto es una condición necesaria para el crecimiento de las bacterias de lixiviación y es decisiva para la solubilización de los metales.

Los microorganismos que participan en la lixiviación bacteriana de sulfuros son acidófilos, ya que son activos a pH por debajo de 3.0, con un pH óptimo para el *Acidithiodacillus ferrooxidans* en el intervalo de 1.5 a 2.5 (Das et al., 1999). Valores de pH cercanos a 1.0 presentan una fuerte inhibición del crecimiento del *A. ferrooxidans*, lo que no ocurre con el *A. thiooxidans*, que presenta caídas en el pH de sus cultivos incluso hasta menos de 1.0, debido a la producción de ácido sulfúrico y a su capacidad de tolerar una mayor acidez (Ossa, 2004; Gómez y Cantero, 2005).

### 2.6.6 Temperatura

Los microorganismos se clasifican en términos de la gama de temperaturas en el que pueden sobrevivir: dentro de las temperaturas óptimas de 30-40<sup>0</sup>C para mesófilos, en torno a 50<sup>0</sup>C para termófilos moderados y por encima de 65 <sup>0</sup>C para termófilos extremos. Por debajo de la temperatura óptima de los microbios se vuelven inactivas, pero a temperaturas por encima de ella, se destruyen rápidamente. La Biooxidación de minerales sulfurados, que es un proceso exotérmico, produce un calentamiento significativo en los reactores de tanque agitado y los montones. El control de la temperatura en montones es difícil. La altura del montón o pila es un factor importante para el aumento de la temperatura, que aumenta con el cuadrado de la altura del montón (Ritchie, 1997). En las operaciones industriales, la temperatura dentro de la pila puede alcanzar hasta 50<sup>0</sup>C ya que las reacciones de oxidación biológica y química no pueden ser regulados, y la consecuencia de una temperatura demasiado alta, obviamente es inhibir la actividad bacterias mesófilas. Los montones se

calientan debido al crecimiento de microorganismos mesófilos y la oxidación de los sulfuros.(Murr y Brierley, 1978).

### **2.6.7 Densidad de pulpa**

La biooxidación de sulfuros con densidades de pulpa mayores de 20% en reactores de tanque agitado no ha tenido buenos resultados (Rossi, 2001; Deveci, 2004). Esto se debe básicamente a que al aumentar la concentración de sólidos aumenta la fricción entre las partículas en el interior de la suspensión, lo que causa el daño celular (Deveci, 2002; Deveci, 2004). Las altas concentraciones de sólidos también limitan las velocidades de transferencia de oxígeno, por lo que se deben suministrar grandes cantidades de éste para oxidar a los sulfuros. Los intentos para mejorar la aireación resultan inevitablemente en aumentos en la velocidad de agitación, lo que genera una mayor fricción entre las partículas dentro de la suspensión (Rossi, 2001). Altas densidades de pulpa generalmente limitan la velocidad de transferencia de oxígeno requiriendo mayor tiempo de biooxidación (Rossi, 2001).

### **2.6.8 Sustrato de mineral**

La composición mineralógica del sustrato es de importancia primordial en la biolixiviación. Un alto contenido de carbonato del material o de ganga incrementará el pH en el líquido de lixiviación y la inhibición o supresión completa de la actividad bacteriana. Para el crecimiento de las bacterias, se puede lograr mediante la adición externa de ácido, pero esto no sólo puede causar la formación y la precipitación de yeso, también afectará el costo del proceso. La tasa de lixiviación también depende de la superficie total del sustrato, una disminución en el tamaño de partícula significa un aumento en el área de superficie de la partícula de modo que el aumento de los rendimientos de metal puede ser obtenido sin ningún cambio en la masa total de las

partículas. Un tamaño de partícula de aproximadamente 42  $\mu\text{m}$  es considerado óptimo.

### 2.6.9 Otros factores

La oxidación del metal mediante los microorganismos acidófilas puede ser inhibida por una variedad de factores tales como compuestos orgánicos, agentes de superficie activa, disolventes, o metales específicos.

La formación de jarosita, es problemático en la lixiviación bacteriana. Una vez formada, se precipita sobre las superficies de minerales y disminuye la eficacia de la interacción del reactivo y la superficie mineral, y la inhibición de la oxidación de metales mediada por microorganismos acidófilas es uno de tales fenómenos.

La fijación de microorganismos para las partículas de mineral ha sido bien demostrado (Sand, 1995). Numerosos estudios han demostrado la presencia de bacterias adheridas a los minerales y / o presente en las soluciones de lixiviación preparadas (PLS) en las operaciones comerciales. Proponiendo un modelo típico para la lixiviación bacteriana, que esencialmente procede por iones férricos complejos mediante las sustancias poliméricas extracelulares secretadas (EPS). (Sand, 1995)

### 2.6.10 Inhibidores de la biolixiviación.

En los procesos de molienda o por la acción del agente de lixiviación, algunos iones se liberan que a ciertas concentraciones son tóxicos para los microorganismos hierro-oxidantes, afectando su crecimiento y actividad. Las sales de potasio producen una fuerte inhibición en la oxidación de iones ferrosos a muy baja concentración. Por otra parte, el cloruro es un conocido inhibidor del crecimiento celular y la oxidación de ferroso a concentraciones tan bajas como 10 mM, ha sido también descrito que concentraciones de nitratos superiores 94 mM inhiben casi completamente la oxidación de iones ferrosos y

---

el crecimiento de *A. ferrooxidans* (Hurahuc ,2000). La presencia de altas concentraciones de sustrato puede causar un efecto inhibitorio sobre la actividad bacteriana mediante el bloqueo momentáneamente el complejo enzima-sustrato. (Luis, 2011).

## 2.7 Lixiviación Química

La lixiviación es la disolución selectiva de los constituyentes de un mineral en una solución, mediante un proceso de reacción de transporte de materia, En términos generales, consiste en la remoción de una o varias sustancias solubles, mediante la acción de un agente lixivante que disuelve la sustancia o metal de interés, permitiendo su recuperación desde el mineral.

La lixiviación química constituye la operación principal de la ruta hidrometalurgia para el tratamiento de minerales de cobre, la disponibilidad de agua terreno, etc.

### 2.7.1 Agentes lixiviantes

La selección del agente químico extractante depende de su disponibilidad, costo, estabilidad química, selectividad, facilidad de producir y regenerar, que permite la recuperación del cobre de la solución acuosa en forma económica. Desde el punto de vista químico los agentes utilizados en la lixiviación del cobre se clasifican en

#### **Ácidos inorgánicos:**

Ácido sulfúrico, Ácido clorhídrico, Ácido nítrico

#### **Bases:**

Hidróxido de amonio

#### **Agentes oxidantes:**

Amoníaco, · Sales de amonio, · Cianuros, · Carbonatos, · Cloruros

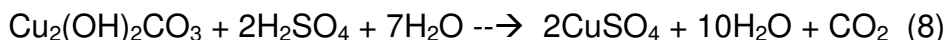
### **Agentes acomplejantes:**

Amoníaco, · Sales de amonio, Cianuros, Carbonatos, Cloruros

El ácido sulfúrico es el agente lixivante más ampliamente utilizado en la lixiviación del cobre, por las razones de cualidad química, costo de fabricación y disponibilidad. Una fuente de producción de ácido sulfúrico (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), es el SO<sub>2</sub> producido en las fundiciones de cobre lo que permite disminuir la polución y obtener ácido como subproducto a un costo relativamente bajo. El consumo de ácido sulfúrico es un ítem de costo altamente significativo en el proceso extractivo, especialmente en las plantas de mediana y baja capacidad, ya que por cada Kg. de cobre producido se consumen de 2,5-7 Kg. de ácido, (según la mena). El consumo de ácido absorbe de un 20 a 40% del costo de producción unitario. El oxígeno atmosférico y el ión férrico producido por acción bioquímica sobre minerales, son los agentes oxidantes más económicos y empleados en los sistemas lixiviantes oxidantes para el cobre.

Los óxidos se caracterizan principalmente por tener como ganga una matriz o roca madre de carbonatos (caliza), que son consumidores de ácidos y tienen un alto contenido de arcilla que dificulta la percolación de la solución durante la lixiviación en pilas. Ejemplo de la reacción para óxidos:

Malaquita



Azurita



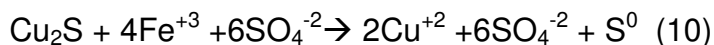
Los minerales sulfurados contienen minerales de cobre y se forman durante largos periodos de tiempos geológicos mediante la lixiviación parcial de la calcopirita (Cu Fe S<sub>2</sub>), conocida como sulfuro primario.

## MARCO TEÓRICO

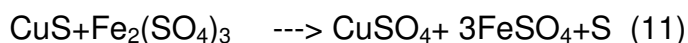
---

Los siguientes sulfuros se lixivian con solución de ácido sulfúrico de acuerdo a las siguientes reacciones (Butts, 1977).

Covalita



Calcosita



**Tabla 2.2 Velocidad de disolución de las principales especies de cobre al lixiviarse en una solución diluida de ácido sulfúrico (Domic 2001).**

<b>Cinética Relativa</b>	<b>Tiempo De Referencia</b>	<b>Especie Minerales De Cobre</b>
Muy Rápida ( a temperatura Ambiente)	Minutos (Disolución completa)	Carbonatos(Malaquita, Azurita)sulfatos (chalcantita , Brochantita)
Rápida(Requiere Mayor acidez)	Horas (Disolución completa)	Óxidos Cúpricos(Tenorita)Silicatos (Crisocola,Dioptasa)
Moderada(requiere Oxidante)	Días a Semanas(Disolución puede ser no completa)	Cobre Nativo, Óxidos Cuprosos(Cuprita,Delafosita)
Lenta(Requiere Oxidante)	Semanas a Meses (Disolución puede ser completa)	Sulfuros Simples(Calcosina, Covelina,Digenita)
Muy Lenta(Requiere Oxidante)	Años ( Disolución es incompleta)	Sulfuros Complejos (Bornita, Calcopirita,Enargita)

### 2.7.2 Variables del Proceso de Lixiviación

#### 2.7.2.1 Granulometría

La cinética de lixiviación de una partícula mejora cuando el mineral es más fino, pero otras consideraciones a nivel macroscópico como la permeabilidad y la aireación son favorecidas cuando la molienda es más gruesa. El tamaño óptimo tendrá un compromiso entre los factores y el costo de la molienda( Miller, 1999).

### 2.7.2.2 Tiempo de lixiviación

La economía del proceso de lixiviación es función del porcentaje de extracción del cobre sin embargo, esto es tan importante como el tiempo necesario para una extracción aceptable, es decir la velocidad de disolución. Por lo tanto la cinética de lixiviación del mineral va a determinar el tiempo de residencia óptimo en la pila.

### 2.7.2.3 Especies mineralógicas de la ganga

Cuando se lixivian los minerales Oxidados / sulfurados con ácido sulfúrico, la cantidad y velocidad de disolución de cobre no dependen solamente de las condiciones del sistema visto desde afuera, como si este fuera una caja negra, ni tampoco de la mineralogía de las especies con cobre, sino la situación es más compleja. Esto se debe principalmente a que existen una infinidad de otras reacciones posibles que puedan ocurrir entre las soluciones lixiviantes y la ganga que hospeda y recubre a los minerales con cobre.

En general las gangas en minerales pórfidos de cobre están constituidos en un 95% por especies silicatadas, carbonatos, sulfatos y los óxidos e hidróxidos de Hierro.

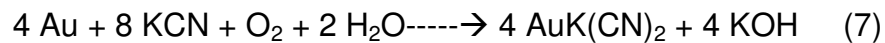
LA influencia de la ganga sobre el proceso de lixiviación de minerales de cobre puede manifestarse a través del consumo de ácido sulfúrico, la cinética de disolución y el grado de penetración de las partículas,

Existen otras variables que también son necesarias a considerar como son: Tasa de Riego, Concentración de Ácido sulfúrico, etc.



## **2.8 Proceso de Cianuración**

El principio básico de la cianuración es aquella en que las soluciones alcalinas débiles tienen una acción directa disolvente preferencial sobre el oro y la plata contenidos en el mineral. La reacción enunciada por Elsher en Journal Prakchen (1946), es la siguiente:



La química involucrada en la disolución de oro y plata en el proceso de cianuración en pilas es la misma aplicada en los procesos de cianuración por agitación. El oxígeno, esencial para la disolución del oro y plata, es introducido en la solución de cianuro mediante la inyección directa de aire al tanque solución de cabeza, por irrigación en forma de lluvia y por bombeo de la solución recirculante (Ángel, 2001).

### **2.8.1 Factores que afectan la cianuración**

Muchas variables afectan la lixiviación de oro y los parámetros de lixiviación, por lo tanto se han estudiado por muchos investigadores para optimizar el proceso de cianuración. Variables tales como las concentraciones de oxígeno y cianuro, pH, tamaño de partícula, temperatura, etc. efecto sobre la disolución de oro tasa, la extracción de oro y el consumo de cianuro (Srithammavut, 2008).

#### **2.8.1.1 Efecto de Pre-tratamiento**

Un tratamiento previo de mineral refractario antes de lixiviación da una mejor extracción de oro y disminuye el consumo de reactivos. Métodos de pretratamiento utilizados son por ejemplo, cloración, bio-oxidación, la oxidación a presión y la oxidación química (Nanthakumar et al., 2007;. Celep et al, 2011).

### **2.8.1.2 Efecto de la Agitación**

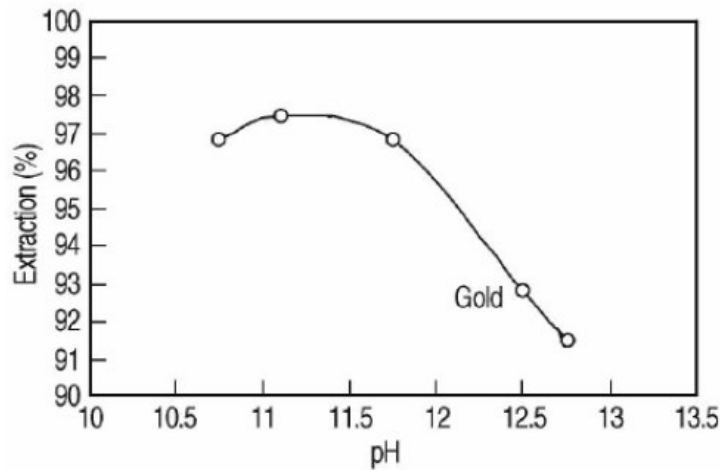
Según Habashi (1999) de lixiviación de oro es un proceso controlado por difusión. Por lo tanto, la velocidad de disolución aumenta con el aumento de la agitación. La velocidad de disolución de oro depende del espesor de capa de difusión y las características de mezcla de grueso de la solución. Todo el partículas deben ser suspendidos en la suspensión por agitación suficiente (Srithammavut, 2008).

### **2.8.1.3 Efecto de la concentración de cianuro**

Aumenta la extracción de oro con el aumento de la concentración de cianuro. Cuando la máxima concentración es alcanzada, el exceso de cianuro no tiene ningún efecto. Máxima concentración de cianuro es 0,075% KCN o NaCN 0,06%, equivalente a 600 ppm (Srithammavut, 2008).

### **2.8.1.4 Efecto del PH**

La alcalinidad de las soluciones de cianuro es importante para lograr altas velocidades de disolución. El pH oscila normalmente 11-12 (Habashi, 1999). El valor pH correcto se mantiene por la adición de cal (CaO). El aumento de pH reduce la velocidad de disolución de oro debido a la adsorción de iones  $\text{OH}^-$  en la superficie de oro disminuyendo la superficie disponible para la lixiviación con cianuro. En la figura 2.4 se ve que la extracción de oro que se reduce en el sistema de alta presión cuando el pH aumenta. Después de todo, cada tipo de mineral y el sistema de lixiviación tiene el pH óptimo en particular (Srithammavut, 2008).



**Figura 2.4 Efecto del pH en la extracción de oro.** Condicion : 20% sólido, 0,6 MPa, 300 min-1, 80 ° C, 1% NaCN, 1 h. (Parga et al, 2007).

### 2.8.1.5 Efecto del Tamaño de Partícula

El tamaño promedio de partículas de mineral es generalmente entre 30-180 micras (Ling P. 1996) el tamaño de partícula más pequeño puede mejorar la velocidad de disolución de oro porque el tamaño de partícula más pequeño proporciona una mayor área de superficie de contacto entre sólido y líquido. También lo contrario ha sido reportado por Kondos et al. (1995). En su investigación se encontró que la molienda más fina aumenta el consumo de cianuro y no mejora la extracción de oro. La velocidad de disolución puede disminuir con la disminución del tamaño de partícula debido a la mayor tasa de consumo de reactivos y reacciones secundarias competitivas (Simo, 2013).

### 2.8.1.6 Efecto de la densidad de la suspensión

Densidad de la suspensión típica en la lixiviación varía entre 35% y 50% de sólidos. Esto depende de factores tales como la gravedad específica de sólidos, tamaño de partícula y la presencia de minerales que afectan viscosidad de la suspensión, por ejemplo arcilla. La transferencia de masa se maximiza cuando densidad de la suspensión es baja (Shrithammavut, 2008.)

## 2.9 Ventajas y desventajas de la biolixiviación

### 2.9.1 Ventajas

No se emiten gases ni polvo, lo que produce un impacto ambiental varias veces inferior a la tecnología clásica de pirometalurgia, que genera emisiones con altos contenidos de dióxido de azufre (SO<sub>2</sub>) y arsénico (As), por el tratamiento de sulfuros en fundiciones.

Reducir el costo energético y operacional respecto a las operaciones convencionales, por ejemplo reducir las temperaturas de operación de 1500°C a condiciones menores a 100°C.

Posibilidad de tratamiento de menas pobres o recursos de leyes bajas que económicamente no son viables por tecnologías convencionales.

Selectividad del ataque bacteriano. Esto provoca, como consecuencia, una fácil Separación de los subproductos del proceso, como es el caso del hierro que aparece en gran cantidad en las materias primas naturales y que en los procesos de biolixiviación precipita como jarositas, de estructura cristalina, que se separan fácilmente por filtración. (Cochilco, 2009)

Durante el proceso se genera parte del ácido y el calor requeridos en la lixiviación. El ácido se genera como producto de las reacciones de oxidación y el calor se libera por la oxidación de la pirita, a veces presente en la matriz de mineral, lo que aumenta cerca de 7°C la temperatura en el medio reduciendo así el consumo de ácido en el proceso.

### **2.9.2 Desventajas.**

Es importante controlar variables como la temperatura, aireación, pH, tamaño de partículas, para asegurar las condiciones óptimas de funcionamiento de las bacterias, pero esto resulta difícil en metodologías de mayor envergadura como los botaderos y las pilas.

Las aguas ácidas que se generan en los procesos deben ser tratadas antes de su vertido a la naturaleza.

La adaptación bacteriana a temperaturas bajas ( $<15^{\circ}\text{C}$ ), ya que a medida que disminuye la temperatura al recuperación de cobre disminuye (cochilco,2009).

**MATERIALES Y MÉTODOS**

### 3.1 Laboratorios de experimentación.

Las pruebas de biolixiviación se han realizado en el Laboratorio de Biometalurgia de la E.A.P de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Respecto al recuento biológico se han realizado en el laboratorio de Microbiología Ambiental de la Facultad de Ciencias Biológicas de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

La caracterización mineralógica se ha realizado en el Laboratorio de Microscopia óptica de la E.A.P de Ingeniería Geológica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

### 3.2 Equipos de prueba.

Equipos de prueba de biolixiviación, el laboratorio de Biometalurgia de la E.A.P de Ingeniería Metalurgia cuenta con 2 shakers “Digisystem DSR-2800D” con control digital de velocidades de 0 a 240 RPM y control de tiempo de 1 minuto a 99 horas, también un Shaker “Gemmy industrial Corp-modelo VRN-480” con control digital de tiempo y velocidades.

Equipo de ORP con un sensor HI 3131 con electrolitos de KCl 3.5M +AgCl y pH marca Hanna HI 2424 .

El recuento biológico se ha realizado en un microscopio biológico binocular” ZEISS”

La caracterización mineralógica de las muestra se ha realizado en un microscopio de luz polarizada por el método de reflexión.

Los análisis químicos se ha realizado mediante Absorción Atómica e ICP (Espectometría de plasma Inducido) dichos análisis se han realizado mediante servicios del sector privado.

Respecto a los pesos de las muestras y reactivos se han realizado en una balanza electrónica “OHAUS” de 3 dígitos y capacidad de 150 gramos.

Demás materiales de vidrio como vasos, Erlenmeyers, tubos de ensayo, pipetas, etc. Son materiales pertenecientes al Laboratorio de Biometalúrgia.

### 3.3 Reactivos.

Los reactivos del presente trabajo se han determinado de acuerdo al proceso o prueba a realizar.

En el proceso de Biolixiviación los reactivos usados son: Sulfato de amonio ( $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ), cloruro de potasio (KCl), fosfato ácido de potasio ( $\text{K}_2\text{HPO}_4$ ), sulfato de magnesio heptahidratado ( $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ), nitrato de calcio ( $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), sulfato de hierro heptahidratado ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) y ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) son reactivos para el medio de cultivo de bacterias 9K, soluciones Buffer de PH 4,7 y 10, todos los reactivos usados han sido de grado “QP”.

En el proceso de cianuración los reactivos son: Cianuro de Sodio (NaCN), Nitrato de Plata ( $\text{AgNO}_3$ ), Cal ( $\text{CaO}$ ), Ioduro de Potasio (KI) y agua destilada.

### 3.4 Variables.

#### 3.4.1 Variables Independientes.

- Densidad de Pulpa
- Concentración de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}(\text{Fe}^{2+})$

#### 3.4.2 Variables Dependientes.

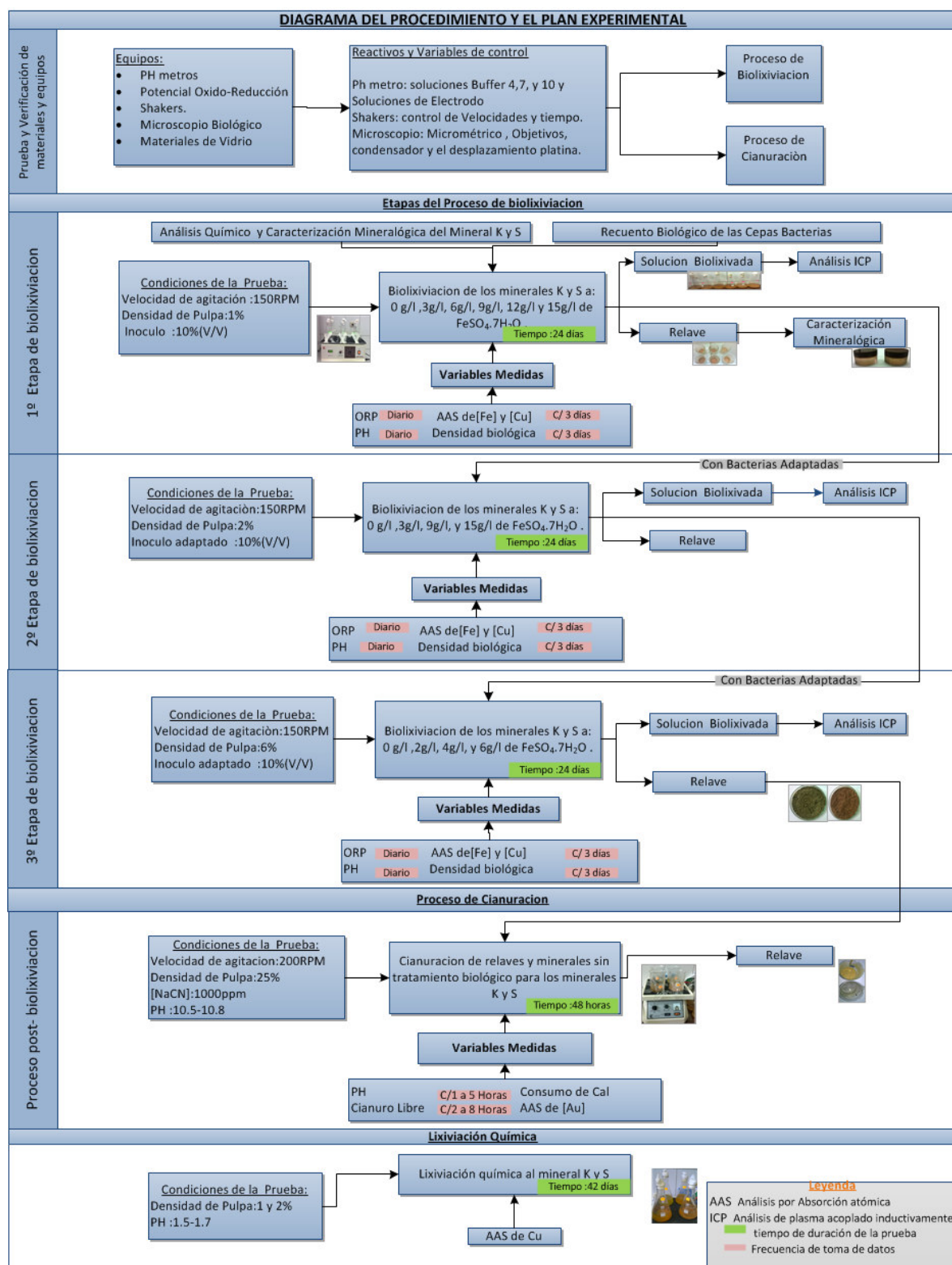
- ORP
- PH
- Concentración de Cu y Fe
- Densidad biológica

Variables cuyos resultados son producto de la experimentación.



### 3.5 Plan de trabajo.

- 1) Al obtener las cepas bacterias ya aisladas (Ver. Anexo) se han realizado pruebas en medio 9K a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  a un PH 1.8 para determinar visualmente la oxidación de  $\text{Fe}^{2+}$  a  $\text{Fe}^{3+}$  y posterior recuento biológico para así verificar la presencia bacteriana para las pruebas de biolixiviación.
- 2) Al considerarse el trabajo de investigación tipo exploratoria, se han determinado proseguir en 3 etapas consecutivas y de acuerdo a los resultados obtenidos, las condiciones a detalle se muestran en la figura 3.1.
- 3) Proceso Post tratamiento biológico mediante el uso de la cianuración para la evaluación del grado de recuperación de Oro.



**Figura 3.1 Plan del procedimiento experimental**

### 3.6 Determinación de la densidad biológica.

Para el proceso de recuento biológico durante las etapas de biolixiviación en las muestras, se ha requerido de los siguientes materiales.

- Pipeta Pasteur.
- Cámara de Neubauer.
- Láminas de microscopio.
- Hoja de microscopio.
- Microscopio biológico binocular.
- Aceite de Inmersión (para aumentos de 100X).

#### **Datos básicos de la Cámara Neubauer improved.**

Cuadro grande central (formado por 400 cuadros pequeños): 1mm.

Cuadro mediano (formado por 4x4=16 cuadros pequeños): 0.2 mm x 0.2 mm.

Cuadro pequeño: 0.05 mm x 0.05 mm.

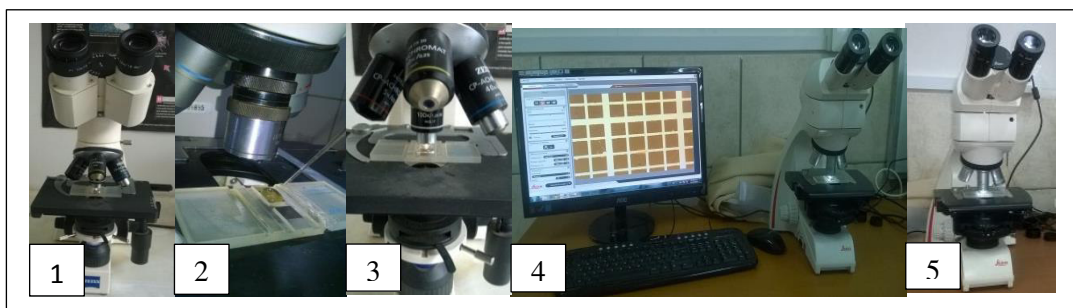
Líneas separadoras: 0.025 mm.

Profundidad=0.1 mm.

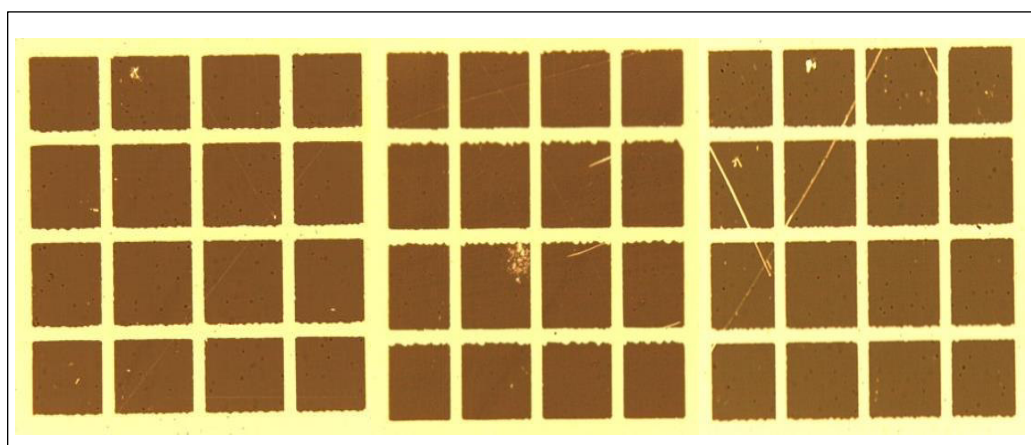
El recuento de las bacterias se ha realizado en 5 cuadrados medianos aleatorios, posteriormente se calculó el promedio para obtener un recuento representativo.

$$\# \frac{Cell}{ml} = \frac{Promedio\ de\ Bacterias}{Volumen\ del\ cuadrado\ mediano}$$

Para mantener la esterilización de las muestras, la extracción de se ha realizado en una cámara en presencia de calor (mechero), en la cámara de neubauer se ha agregado 1 gota de la muestra extraída mediante la pipeta Pasteur (ver imagen 2) posteriormente se ha colocado la lámina de microscopio con cuidado, para las lecturas se han realizado en un aumento de 100x el cual requiere agregar una gota de aceite de inmersión sobre la lámina de microscopio



**Figura 3.2** 1,2,3 Microscopio biológico binocular utilizado en el recuento biológico . 4,5 Microscopio Binocular Marca “LEICA” con software para la captura de imágenes.



**Figura 3.3** Imágenes capturadas mediante el microscopio binocular para las muestras del mineral S y K

Las imágenes capturadas son del cuadrado mediano de la cámara de Neubauer el cual está formado por 16 cuadrados pequeños donde se ha realizado el recuento biológico. Son 5 cuadrados medianos como los mostrados en las imágenes donde se realiza el recuento para posteriormente ponderar y reemplazar en la fórmula para la obtención de la densidad biológica (#Cell/ml).

### 3.7 Análisis de los minerales

Los minerales con los que se ha realizado las pruebas de biolixiviación tienen las siguientes características y procedencia.

**3.7.1 Mineral S:** Mineral sulfurado de cobre procedente de la provincia de Conchucos del departamento de Ancash.

Au	As	Cu	Fe	S
g/t	%	ppm	%	%
13.9	9.37	7389	22.69	20.38

**Tabla 3.1 Composición química del mineral S**

Se ha realizado un análisis mineralógico el cual se ha obtenido el porcentaje de volumen de cada especie mineralógica resultando FeS<sub>2</sub> 45.30% ,CuFeS<sub>2</sub> 1.90% ,FeO.OH 0.20% ,AsFeS<sub>2</sub> 13.12% y gangas 25.48%

**3.7.2 Mineral K:** mineral Sulfurado y oxidado de cobre procedente de la provincia de Caraveli del departamento de Arequipa.

Au	As	Cu	Fe	S
g/t	%	ppm	%	%
8.9	0.41	1796	16.29	7.44

**Tabla 3.2 Composición química del mineral K.**

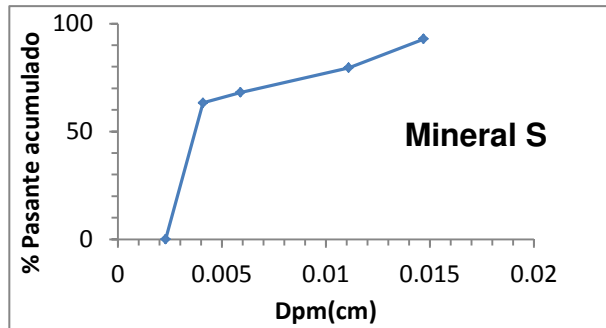
Se ha realizado un análisis mineralógico el cual se ha obtenido el porcentaje de volumen de cada especie mineralógica resultando FeS<sub>2</sub> 26.8% CuFeS<sub>2</sub> 0.10% FeO.OH 9.95% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 1.22% gangas 42.29%.

De los análisis químicos para los respectivos minerales, se observa que el mineral S contiene mayores cantidades de minerales sulfurados y férricos respecto al mineral K, posteriormente se ha realizado la mineralogía para determinar dichos compuestos mineralógicos. El realizar la biolixiviación con dos minerales distintos nos proporciona variedad de datos para concluir algún efecto de algunos compuestos como las gangas en el proceso de biolixiviación.

### **3.7.3 Análisis granulométrico para el mineral S y K.**

Para el análisis granulométrico de las muestras de minerales S y K, se ha realizado mediante el uso de mallas Tyler determinándose la malla y el diámetro correspondiente al 80 % pasante.

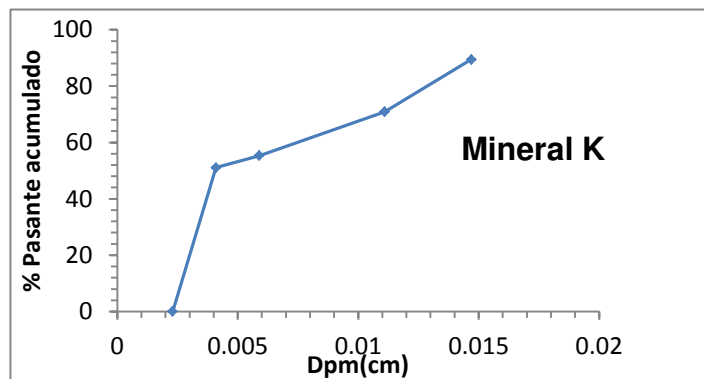
### 3.7.3.1 Análisis granulométrico del mineral S.



**Figura 3.4** Distribución granulométrica para el mineral S.

En la figura 3.4 Se muestra que el 80% del pasante es de diámetro promedio (Dpm) 0.011cm el cual corresponde a la malla Tyler -200.

### 3.7.3.2 Análisis granulométrico del mineral K.



**Figura 3.5** Distribución granulométrica para el mineral K

En la figura 3.5 Se muestra que el 80% del pasante es de diámetro promedio (Dpm) 0.013cm el cual corresponde a la malla Tyler -150.

## 3.8 Mineralurgia de los minerales S y K.

El estudio mineralógico de las muestras se ha realizado mediante el microscopio de luz polarizada por el método de reflexión, para lo cual previamente se han preparado las secciones pulidas y a partir de esta se han

caracterizado y determinado las especies mineralógicas que conforman en cada muestra.

### **3.8.1 Caracterización mineralógica al mineral S.**

La caracterización de este mineral se muestra en la siguiente Tabla.

<b>Minerales</b>	<b>Formula</b>	<b>Abrev.</b>	<b>Volumen Porcentual</b>	<b>% De Liberación</b>
Pirita	FeS <sub>2</sub>	py	45.30	95.06
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	cp	1.90	84.21
Esfalerita	SZn	ef	8.90	79.28
Goetita	FeO.OH	gt	0.20	100.00
Galena	PbS	gn	3.69	71.20
Arsenopirita	AsFeS <sub>2</sub>	apy	13.12	93.90
Boulangerita	Pb <sub>5</sub> Sb <sub>4</sub> S <sub>11</sub>	boul	1.15	76.90
Enargita	---	en	0.12	0.00
Covelita	CuS	cv	0.06	0.00
Oro	Au	Au	0.00	0.00
Tenantita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>3,25</sub>	tn	0.95	85.10
Bournonita	PbCuSbS <sub>3</sub>	bnn	---	---
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	rt	---	---
Gangas	---	GGs	25.48	97.50

**Tabla 3.3 Mineralogía del mineral S.**

#### **3.8.1.1 Grados de liberación.**

El grado de liberación para cada componente nos indica el % libre que se encuentra del volumen total que ocupa dicho componente.

Interpretación para algunos minerales.

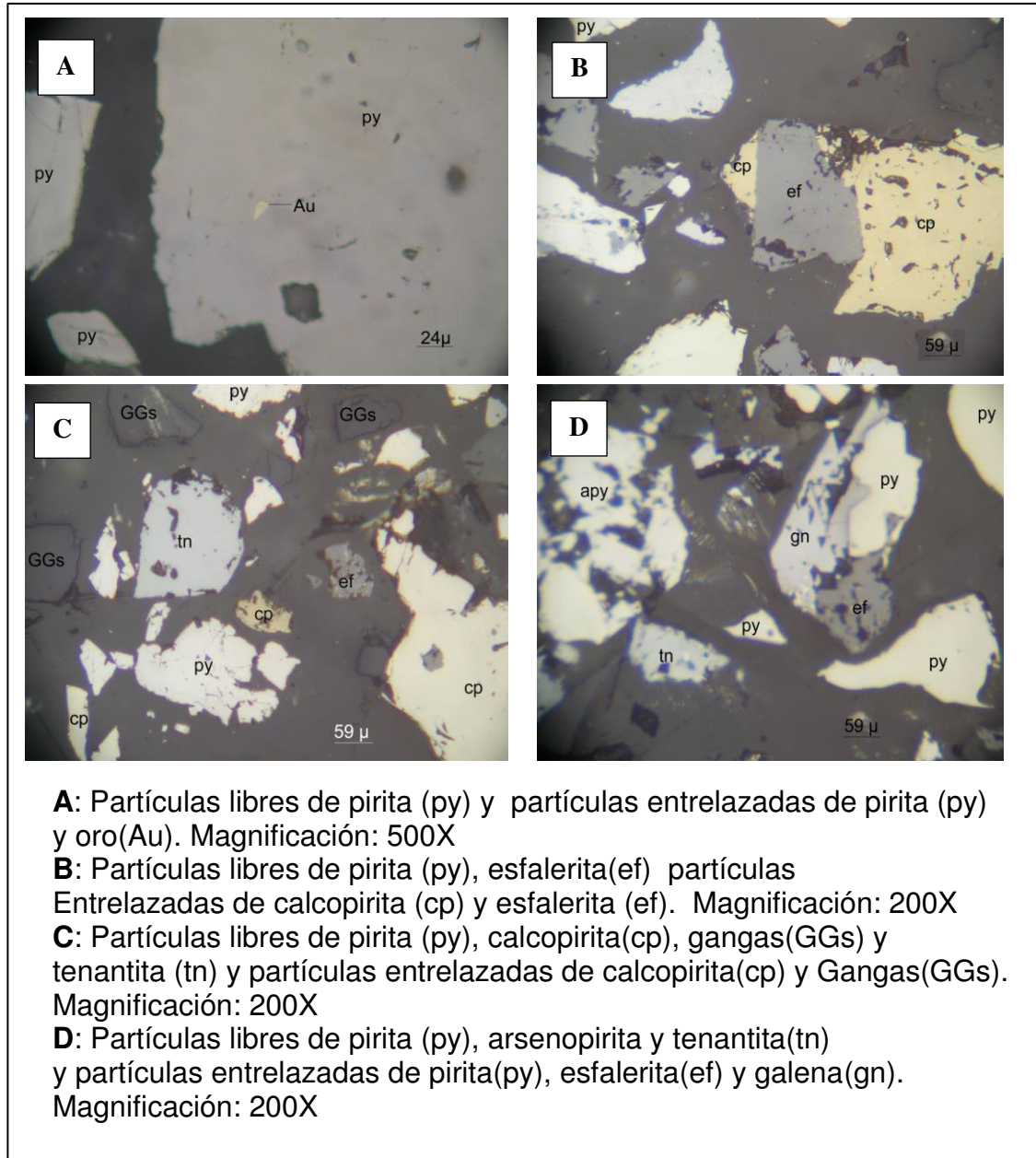
La calcopirita ocupa el 1,90 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 84,21% se halla libre, mientras que el 15,79% restante se encuentra aún entrelazado.

La arsenopirita ocupa el 13,12 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 93,90% se halla libre, mientras que el 6,10% restante se encuentra aún entrelazado.



El oro ocupa el ,01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100 se encuentra entrelazado.

### 3.8.1.2 Micrografías del mineral S.





### 3.8.2 Caracterización mineralógica al mineral K.

La caracterización del mineral K se muestra en la siguiente Tabla.

Minerales	Formula	Abrev.	Volumen, %	% de Liberación
Pirita	FeS <sub>2</sub>	py	26.80	91.83
Calcopirita	CuFeS <sub>2</sub>	cp	0.10	0,00
Esfalerita	<u>S</u> Zn	ef	0.30	83.33
Goetita	FeO.OH	gt	9.95	90.49
Pirrotita	Fe <sub>1-x</sub> S	po	14.55	93.70
Arsenopirita	AsFeS <sub>2</sub>	apy	1.46	100.00
Rutilo	TiO <sub>2</sub>	rt	0.63	38.50
Hematita	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	hm	1.22	100.00
Marcasita	FeS <sub>2</sub>	mc	1.22	100.00
Oro	Au	Au	0.01	0.00
Tenantita	Cu <sub>3</sub> AsS <sub>3,25</sub>	tn	0.02	0.00
Covelita	CuS	cv	---	---
calcosita	Cu <sub>2</sub> S	cc	---	---
Oxido de Mn	MnO <sub>2</sub>	Ox. Mn	---	---
Gangas	--	GGs	42.29	94.90

**Tabla 3.4 Mineralogía del mineral K**

En esta muestra se ha encontrado oro en pirita de un tamaño de tres micras. Asimismo también se encontró oro en el contacto entre covelita y gangas de un tamaño de 5 micras. En minerales Ferríferos están la hematita, pirita, arsenopirita, pirrotita y la goetita, en minerales cupríferos está la calcopirita, covelita, calcosita y tenantita y otros minerales en gangas (dentro de éstas están los silicatos y carbonatos).

### 3.8.2.1 Grados de liberación.

El grado de liberación para cada componente nos indica el % libre que se encuentra del volumen total que ocupa dicho componente.

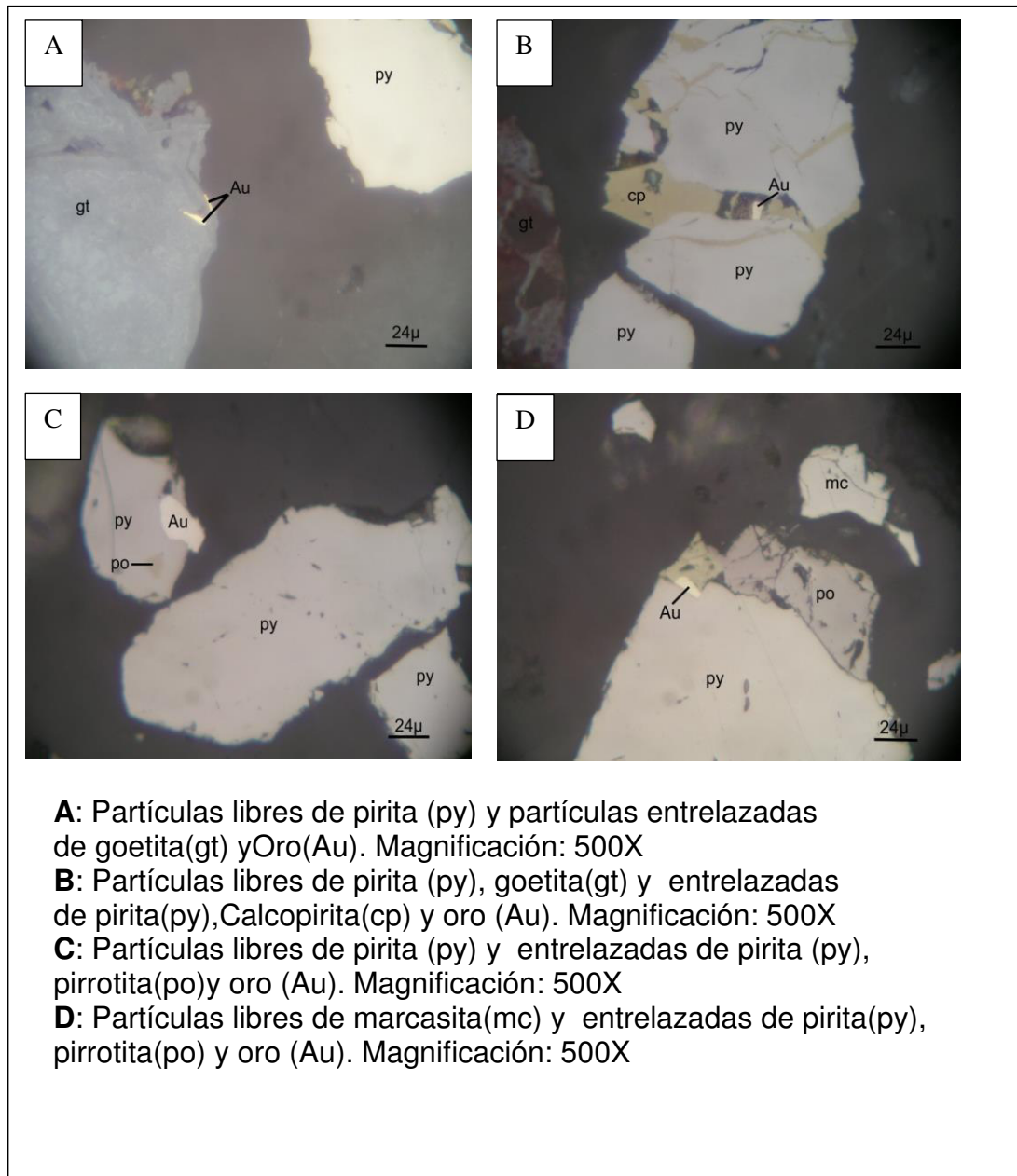
Interpretación para algunos minerales

La calcopirita ocupa el 0.10 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 100,00 se encuentra aún entrelazada.

La arsenopirita ocupa el 1.46 % del volumen total de la muestra, de este volumen el 100.00 se halla libre.

El oro ocupa el 0.01% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100% se encuentra entrelazado.

### 3.8.2.2 Micrografías del mineral K.



## **PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL**

## **4.1 Pruebas de Biolixiviación**

Las pruebas de biolixiviación se han realizado en 3 etapas secuenciales para cada mineral, con soluciones de 9K modificando las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en cada etapa. La agitación ha sido constante a 150 RPM y a condiciones de temperatura ambiental promedio de  $19.5^\circ\text{C}$ , en las etapas se han iniciado con un PH 1.8, evaluando las variables de ORP(mV), recuento biológico (#Cell/ml) mediante un microscopio biológico y la determinación de Cobre(Cu) y Hierro Total(Fe) durante cada etapa mediante Absorción Atómica. Al final de cada etapa se ha analizado la solubilidad del Arsénico, hierro y Azufre mediante análisis de ICP. La Primera etapa es considerada como etapa de adaptación biológica hacia el mineral, del cual se obtendrá inóculos adaptados para las etapas siguientes cuya finalidad es mejorar la recuperación del metal valioso y reducir el tiempo de biolixiviación.

Al variar la densidad de pulpa se ha evaluado el efecto sobre el crecimiento biológico y la adaptación al incremento de mineral en cada prueba, asimismo la mediciones de pH nos indican el efecto en la generación de  $\text{H}^+$  en cada etapa de prueba.

En el caso de ORP es una condición fisicoquímica que cambia durante una operación de biolixiviación como consecuencia de la actividad celular. Durante la extracción de cobre, el nivel Eh es altamente dependiente de la relación de ion ferroso-férrico, pero también depende de otros pares galvánicos. Normalmente al comienzo de una operación de biolixiviación la solución de lixiviación Eh es de alrededor de 350 mV y la tasa de extracción de cobre se vuelve importante una vez valores de Eh obtener más de 450 mV. En este sentido, Eh es una variable importante para cuantificar durante la biolixiviación con el fin de utilizarlo como un índice para evaluar el comportamiento del proceso. Últimamente, Eh también ha sido señalado como un factor importante, ya que hay evidencia experimental de que se logre una mejor extracción de cobre de calcopirita usando bajo Eh que los valores habituales obtenidos en las

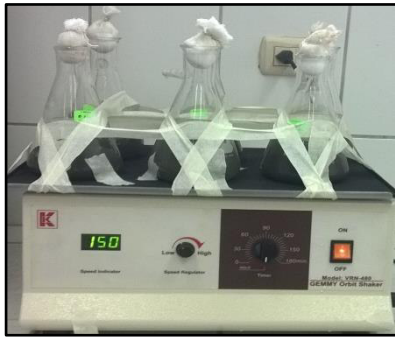
operaciones normales de biolixiviación donde el Eh logra alcanzar valores de alrededor de 600 a 700 mV ( Gericke 2009).

La variación de Sustrato ( $\text{Fe}^{2+}$ ) ha sido considerado para obtener la adaptación óptima y el efecto sobre el crecimiento biológico y la recuperación del metal valioso, considerando la elevada concentración de Fe en el mineral , es necesario evaluar para determinar la necesidad de usos de sustrato en las etapas con inóculos ya adaptados al mineral.

### 4.1.1 Primera Etapa de Biolixiviación

Para cada mineral, se han preparado soluciones con el medio 9K con las concentraciones de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , (3.00 g/l), KCl (0.100 g/l),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.500 g/l),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , (0.500 g/l) ,  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (0.01 g/l), modificando la concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  de 0.00 a 15.00 g/l en un rango de 3.00g/l.

En cada Erlenmeyer de 500 ml se ha agregado 3 gramos de mineral (1% W/V), 30 ml de Inoculo biológico (10% V/V) y completando con la solución de 9K a 300 ml para cada Erlenmeyer a las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  , se ha regulado el PH a 1.8 con solución concentrada de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  y posteriormente se dio inicio a la biolixiviación .



**Figura 4.1** Incios de la Primera etapa de biolixiviación del mineral S, a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

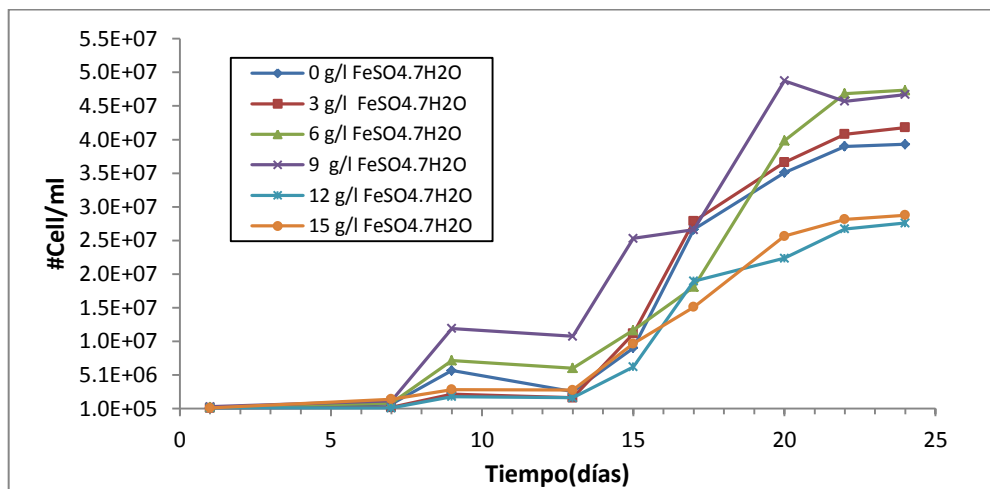


**Figura 4.2** Incios de la Primera etapa de biolixiviación del mineral K, a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

### 4.1.1.1 Parámetros medidos para el Mineral S

Los parámetros medidos para el mineral S, son PH, ORP (mv), Densidad biológica (#Cell/ml), porcentaje de recuperación de Cobre y Concentración de Hierro total (Fe) los cuales se muestra a continuación.

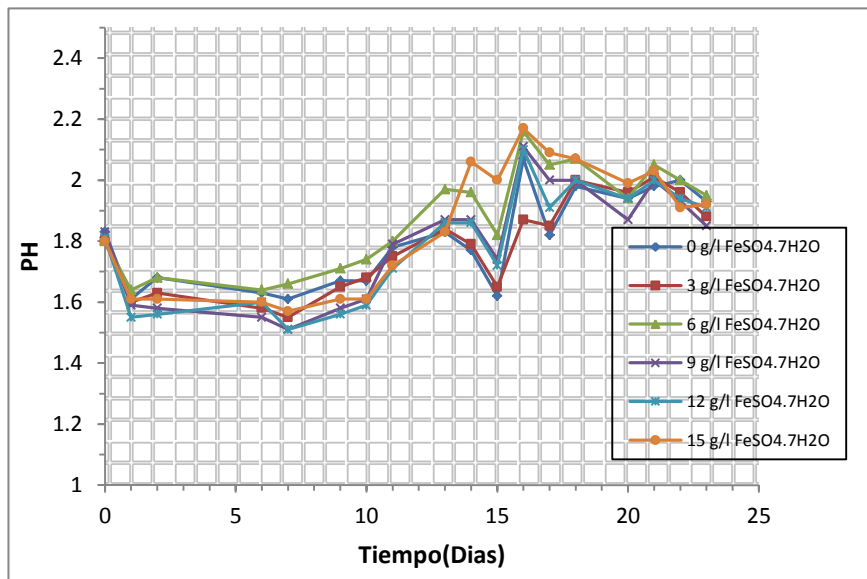
#### 4.1.1.1.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.



**Figura 4.3** Crecimiento biológico durante la primera etapa para el mineral S.

La figura 4.3 Muestra el crecimiento de la densidad biológica a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , la densidad biológica del inoculo ha sido de  $7.05 \times 10^7$  Cell/ml observándose el inicio del crecimiento exponencial a los 10 días de iniciado la etapa, en los días 21 a 24, la densidad biológica a las diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , tienden a mantenerse constante, indicando la etapa final del crecimiento biológico. La máxima densidad biológica alcanzada hasta los 24 días ha sido de  $4.75 \times 10^7$  Cell/ml a 6 g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  llegando al 67 % del inoculo.

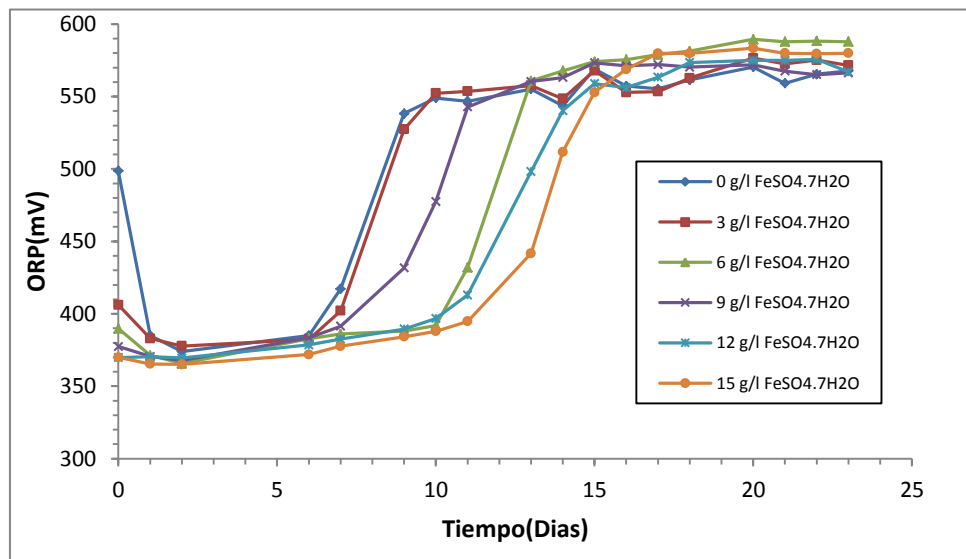
#### 4.1.1.1.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.4 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el PH durante la primera etapa para el mineral S.**

Se dio inicio a un PH 1.8 para todas las pruebas a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , durante la etapa hasta los 19 días, el PH mínimo promedio ha sido de 1.6, mientras el máximo ha sido e promedio de 2.1, manteniendo en PH promedio de 1.9, posteriormente el PH tiende a descender debido a generación de  $\text{H}^+$  ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) de acuerdo a los mecanismos planteados.

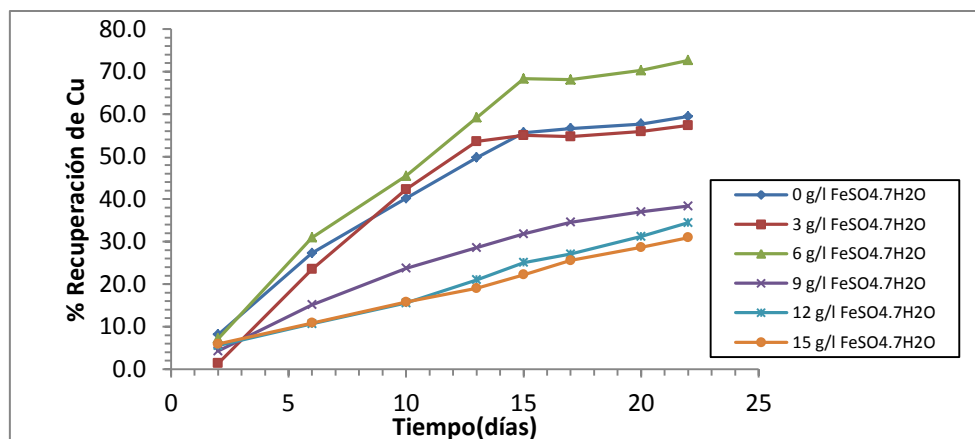




**Figura 4.5 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en ORP durante la primera etapa para el mineral S.**

Se muestran el efecto de ORP(mV) para cada muestra realizada, a los primeros 6 días la muestra de 0 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  inicia un incremento de 250 mV llegando a un máximo al décimo día de 550mV. Luego, de 10 días iniciado la biolixiviación, la muestra de 15g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  inicia un incremento hasta llegar a un máximo 560mV, Posteriormente todas las muestra se mantienen en promedio a 575mV.

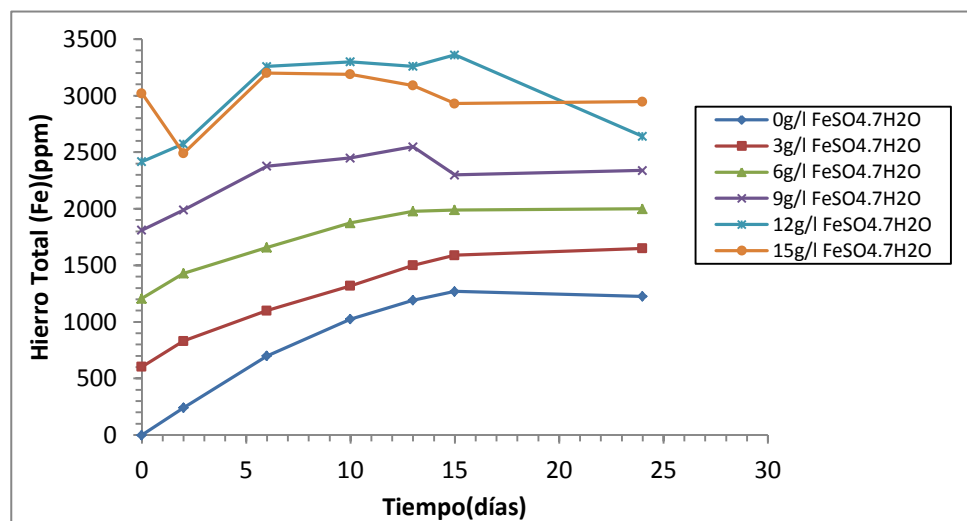
#### 4.1.1.1.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.6 Porcentaje de recuperación de cobre durante la primera etapa para el mineral S.**

De la figura 4.6, se ha observado que la máxima recuperación obtenida para esta primera etapa es de 72.64% a 6g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  Y la recuperación mínima de 30.96 % a 15 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Después de los 18 días iniciado la biolixiviación se observado que el porcentaje de recuperación de cobre no muestra un incremento considerable respecto a los primeros 17 días. Considerar para este comportamiento el crecimiento biológico que involucra en el porcentaje de recuperación ya que la densidad biológica da inicio a la etapa constante, como también la solubilización de hierro producto de la oxidación de las especies sulfuradas del mineral.

#### 4.1.1.1.4 Concentración de hierro total (Fe).



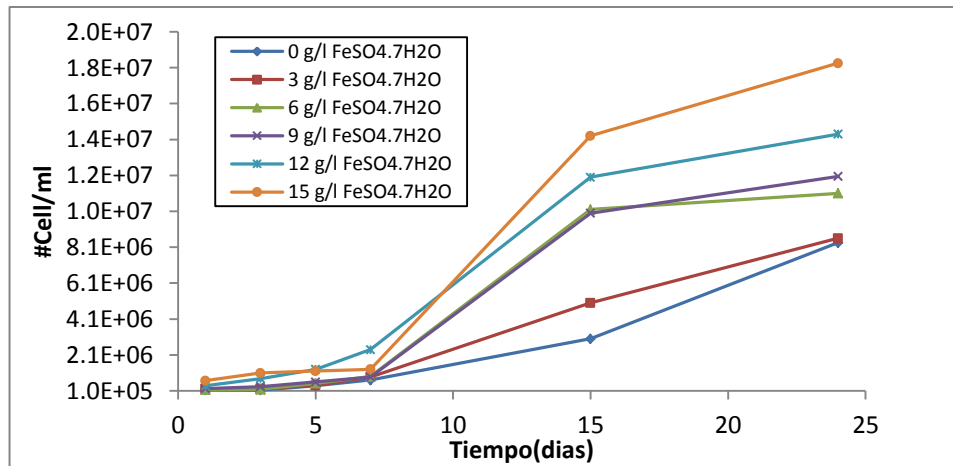
**Figura 4.7 Concentración de Hierro Total (Fe) durante la primera etapa para el mineral S.**

La figura 4.7 nos muestra el incremento de la concentración de hierro total (Fe), mostrando un incremento de la solubilidad del hierro del mineral sulfurado, alcanzando los puntos máximos para todas las pruebas a los primeros 15 días.

#### 4.1.1.2 Parámetros medidos para el Mineral K

La mineralogía del mineral K, muestra concentraciones de especies oxidadas y un alto nivel de gangas, por tal motivo observar la similitud o diferencia en el comportamiento de los parámetros respecto al mineral S amplia las conclusiones del proyecto.

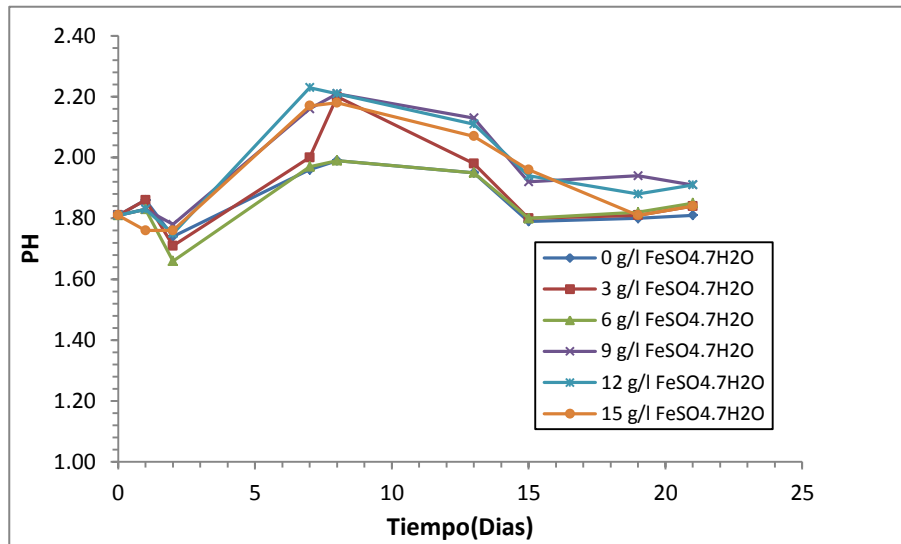
##### 4.1.1.2.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.



**Figura 4.8 Crecimiento biológico durante la primera etapa para el mineral K.**

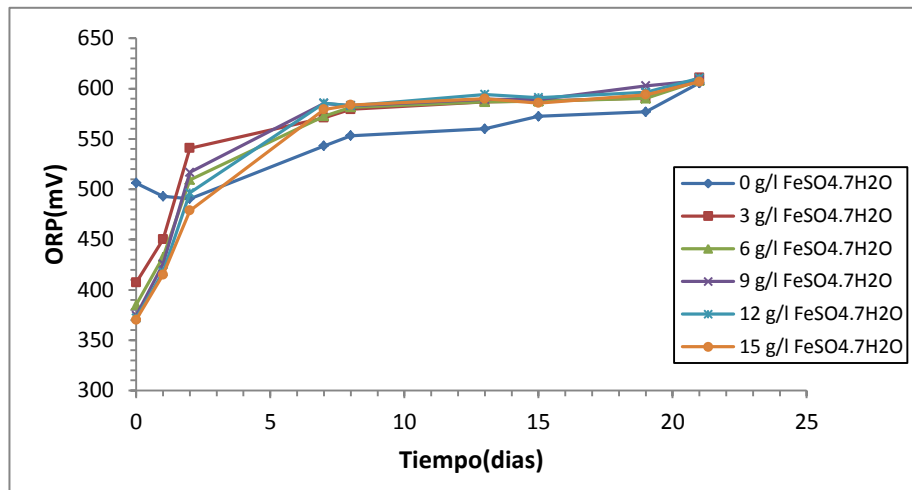
El inóculo para esta prueba a sido de  $4.6 \times 10^9 \text{ Cell/ml}$ , la máxima concentración biológica de  $1.8 \times 10^7 \text{ Cell/ml}$  a 15g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  ha registrado solo el 0.39 % del inóculo. Muy diferente al mineral S que a dicha concentración de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  la densidad biológica ha sido una de las mínimas respecto a las demás pruebas pero el nivel de recuperación respecto al inóculo ha sido mucho mayor (67%), esto implica el efecto de la especies mineralógicas como los sulfuros del mineral S que conforman un sustrato en el crecimiento biológico.

#### 4.1.1.2.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.9 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el PH durante la primera etapa para el mineral K.**

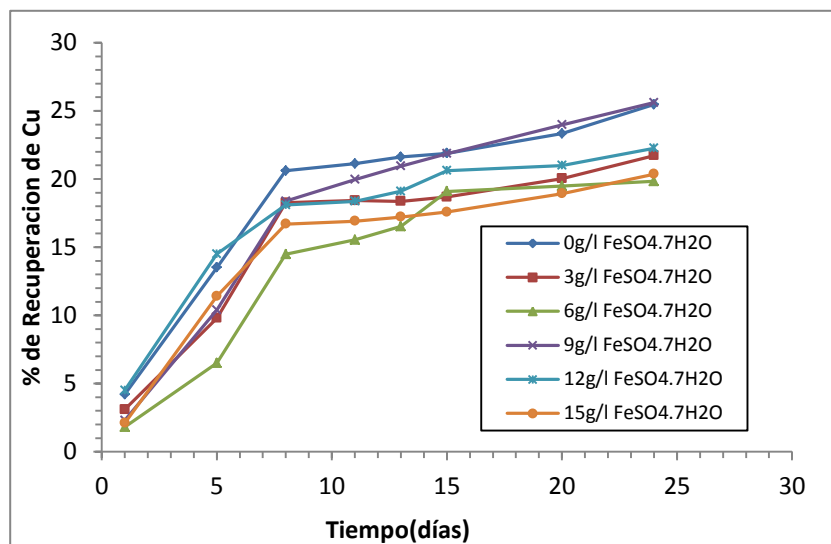
Se ha iniciado a un PH de 1.8 corrigiendo con Ácido sulfúrico concentrado, se alcanzó niveles de PH elevados al séptimo día, siendo el máximo de 2.23 a 12 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , posteriormente se dio inicio a un descenso para todas las muestras, durante la etapa de biolixiviación no habido agregado de ácido sulfúrico excepto al inicio, el nivel de PH promedio final se han mantenido en un rango de 1.7 a 1.9. Respecto al mineral S los valores de PH en ascenso han sido al día 7, mientras en el mineral K a los 3 días de iniciado la biolixiviación, esto debido a las características más sulfuradas del mineral S respecto al mineral K (oxidado), lo cual es una variable importante a considerar.



**Figura 4.10 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el ORP durante la primera etapa para el mineral K.**

El incremento de los valores de ORP se han observado en los primeros 7 días, en comparación del mineral S que recién al séptimo día empieza un ascenso, el valor máximo promedio para esta etapa es de 605mV ,5.0% más respecto a dicho mineral.

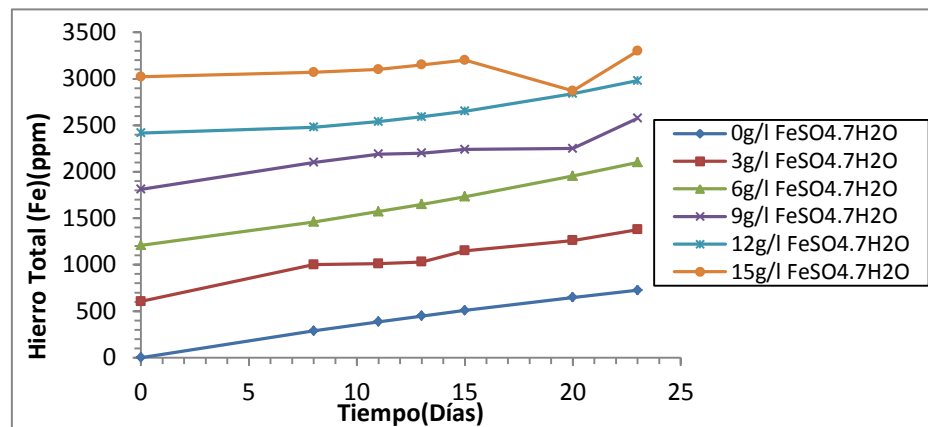
#### 4.1.1.2.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.11 Porcentaje de recuperación de cobre durante la primera etapa para el mineral K.**

Según la figura 4.11 el porcentaje máximo de recuperación ha sido de 25.61% a 12 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  y la recuperación mínima de 19.88% a 6g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  cabe resaltar que son los primeros 10 días en los que se muestra una pendiente de ascenso mucho mayor respecto a los días siguientes, resultando así para 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , un incremento de 16.6% en los primeros 8 días, luego en los 16 días siguientes solo un 4.51% respecto al día 8. Con respecto al mineral S, para 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , el porcentaje de recuperación máxima ha sido 33.84% menos que la recuperación obtenida en el mineral S(59.45%).

#### 4.1.1.2.4 Concentración de hierro total (Fe).



**Figura 4.12 Concentración de Hierro Total (Fe) durante la primera etapa para el mineral K.**

Las concentraciones de hierro total (ppm) durante esta etapa se han incrementado indicando la solubilidad del mineral producto de la oxidación biológica y química.

#### 4.1.2 Segunda Etapa de Biolixiviación.

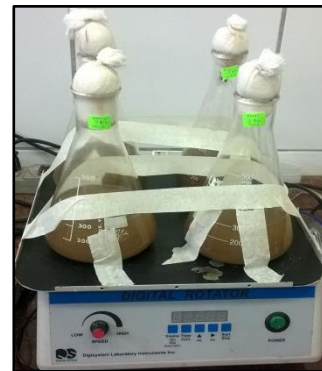
Para cada mineral, se han preparado soluciones con el medio 9K con las concentraciones de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , (3.00 g/l),  $\text{KCl}$  (0.100 g/l),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.500 g/l),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , (0.500 g/l),  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (0.01 g/l), modificando la concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 0.00g/l, 3.00g/l, 9.00g/l y 15.00 g/l. la diferencia respecto a la primera etapa es solo por optar un mayor rango de comparación.

En esta etapa la densidad de pulpa se ha duplicado (2%W/V), por el cual el peso de cada mineral es de 6 gramos para cada Erlenmeyer, la agitación constante de 150RPM.

El volumen de inoculo, se ha extraído de la solución de la primera etapa, considerando que habido una adaptación biológica al mineral, el volumen inoculo ha sido de 30 ml, 10%(V/V) respecto al volumen total.



**Figura 4.13** Inicios de la segunda etapa de biolixiviación del mineral S, a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

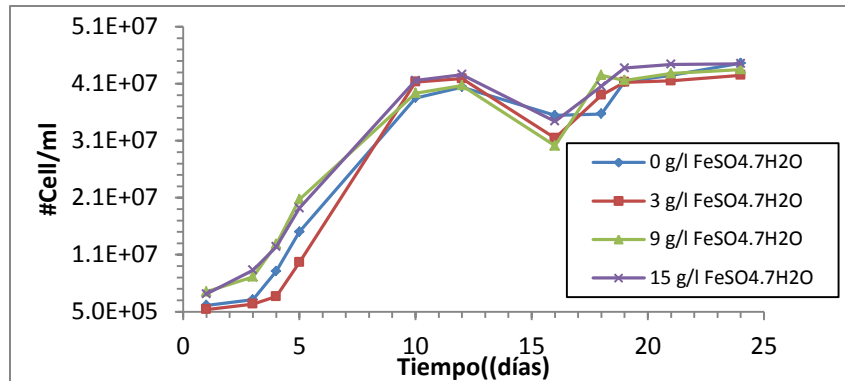


**Figura 4.14** Inicios de la segunda etapa de biolixiviación del mineral K, a diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

##### 4.1.2.1 Parámetros medidos para el Mineral S

Los parámetros medidos son los mismos respecto a la primera etapa, para obtener resultados comparativos entre etapas y posteriores conclusiones.

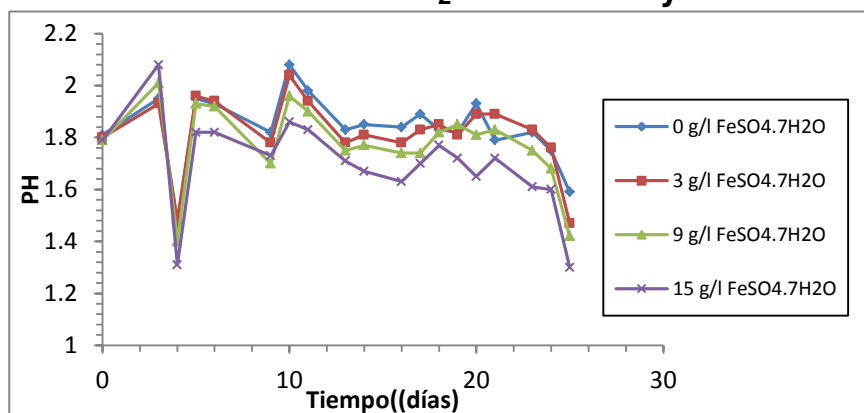
#### 4.1.2.1.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.



**Figura 4.15 Crecimiento biológico durante la segunda etapa para el mineral S.**

La densidad biológica del inóculo ha sido de  $4.73 \times 10^7 \text{ Cell/ml}$ , a los 3 días de iniciado la biolixiviación empieza el crecimiento exponencial, en comparación a la primera etapa, se ha logrado reducir el tiempo en 5 días, ya que el inicio del crecimiento exponencial se dio a los 10 días. Para esta etapa se observa que a 0 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  se logra una concentración máxima de  $4.41 \times 10^7 \text{ Cell/ml}$  respecto a las demás concentraciones, concluyéndose la adaptación biológica en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

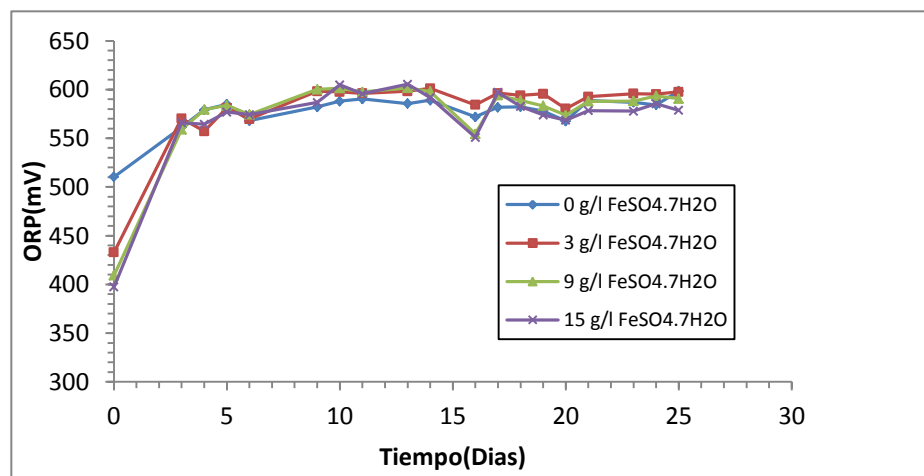
#### 4.1.2.1.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.16 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el pH durante la segunda etapa para el mineral S.**



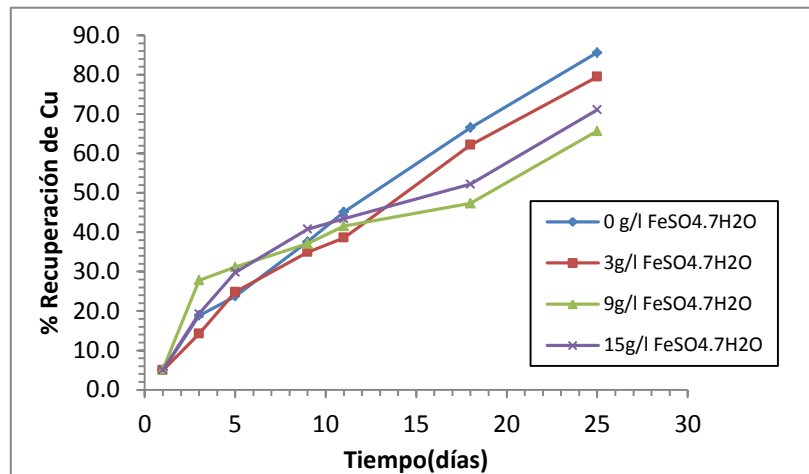
Se ha observado un incremento de PH en los primeros 3 días, alcanzando un máximo de 2.08 a 15g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  por el cual se decidió corregir con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , por el cual se observa un cambio de descenso hasta valores de 1.4, posteriormente no hubo agregado de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Este incremento se debió al duplicar la cantidad de mineral respecto a la primera etapa. Durante los siguientes 17 días el PH se ha mantenido en promedio en 1.8, siguiendo una tendencia de descenso en los últimos días producto del mecanismo de producción de  $\text{H}^+$ .



**Figura 4.17 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el ORP durante la segunda etapa para el mineral S.**

En la figura 4.17 se muestra que solo en los primeros 3 días se logra obtener valores cercanos al máximo durante toda la etapa, en comparación a la primera etapa este suceso se dio al sexto día y durante 4 días. Los valores promedio máximo para las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  son de 585mV, 10mV mayor en comparación a la primera etapa.

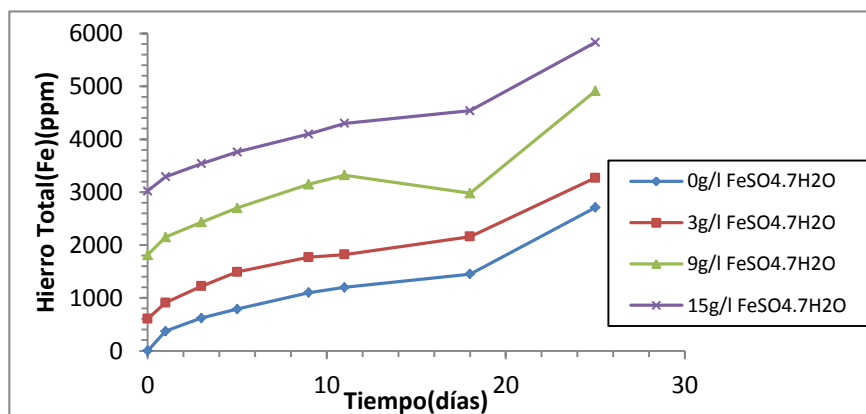
#### 4.1.2.1.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.18** Porcentaje de recuperación de cobre durante la segunda etapa para el mineral S.

Se ha observado que para las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  tienden un incremento lineal durante la etapa de biolixiviación, alcanzándose una recuperación máxima de 85.6% a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , un 26.15% más respecto a la primera etapa que se logró recuperar solo el 59.45% de cobre a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

#### 4.1.2.1.4 Concentración de hierro total (Fe).



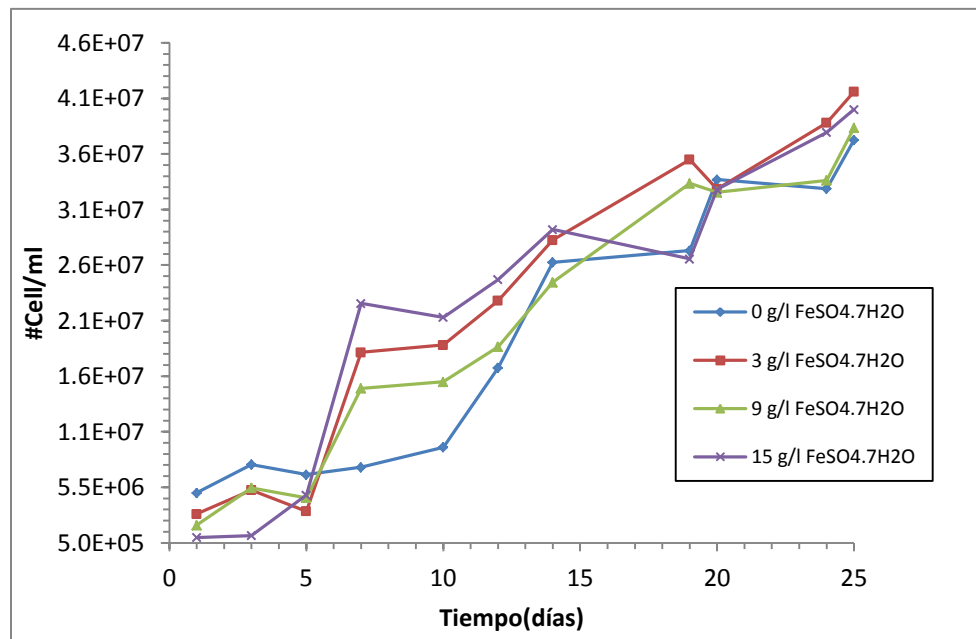
**Figura 4.19** Concentración de Hierro Total (Fe) durante la segunda etapa para el mineral S.

Se ha observado un incremento lineal de las concentraciones de hierro total el cual es resultado de la biolixiviación de los minerales con contenido de Hierro, al duplicar la cantidad de mineral para esta prueba también incrementa las concentraciones de Hierro Total en la solución lixiviada. Por ejemplo a 0g/l en la primera etapa se ha logrado una concentración máxima de 1225.98 ppm mientras en la segunda etapa se ha alcanzado un concentración máxima de 2711.21 ppm.

#### **4.1.2.2 Parámetros medidos para el mineral K**

Durante la segunda etapa, los parámetros medidos son comparados respecto a la primera etapa considerando que se ha duplicado la densidad de pulpa a 2%(W/V) y el volumen del inóculo ha sido extraído de la primera etapa.

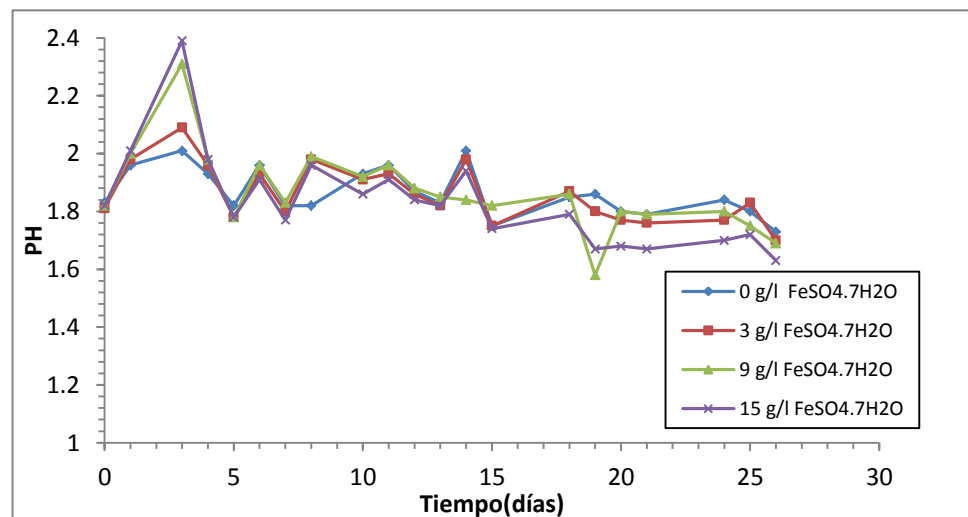
##### **4.1.2.2.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.**



**Figura 4.20 Crecimiento biológico durante la segunda etapa para el mineral K.**

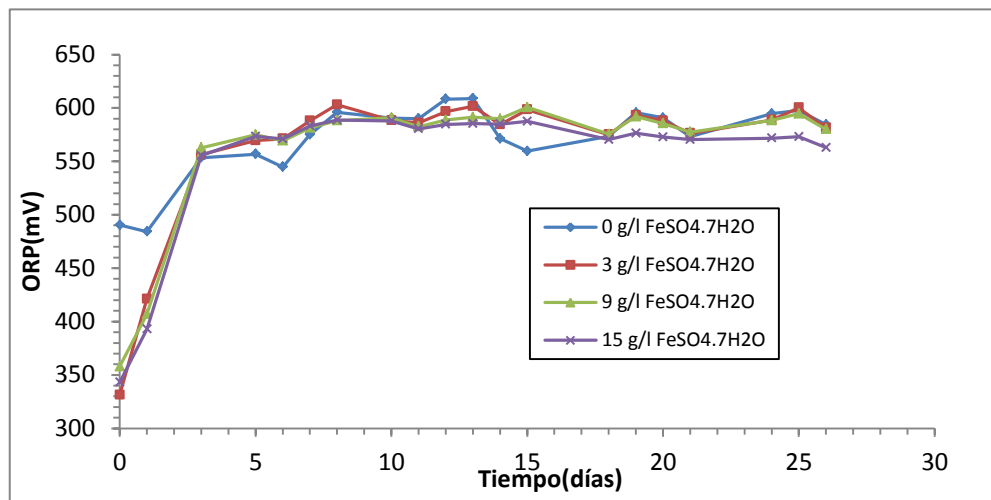
La figura 4.20 muestra el incremento de la densidad biológica para el mineral K, la concentración del inoculo ha sido de  $6.95 \times 10^6$  Cell/ml, en los primeros 6 días se logra incrementar la densidad biológica mayor a la del inoculo. Durante los posteriores 19 días el crecimiento ha sido exponencial, logrando la concentración máxima de  $4.10 \times 10^7$  Cell/ml a 3 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , solo un 10.8% más respecto a la máxima concentración a 0 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  que registró  $3.70 \times 10^7$  Cell/ml.

#### 4.1.2.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.21 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el PH durante la segunda etapa para el mineral K.**

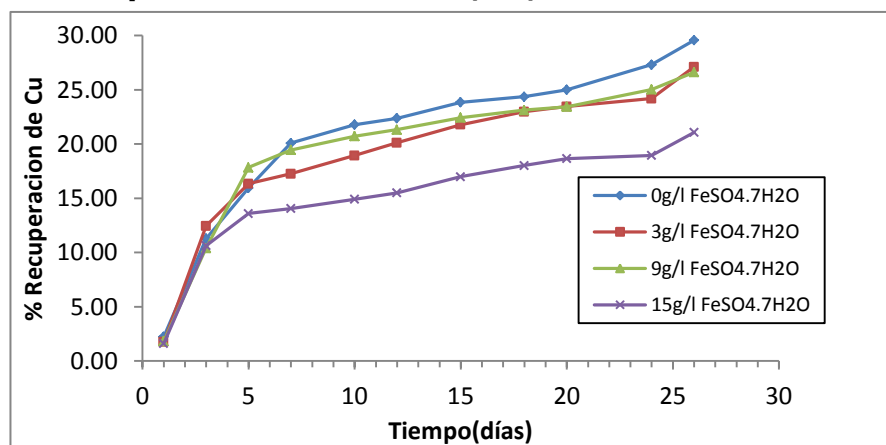
Como se muestra en la figura 4.21 en los primeros 3 días el PH asciende hasta un máximo de 2.39 a 15g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , este incremento se debe a que se ha duplicado la concentración de mineral. Se ha agregado 2 gotas de ácido sulfúrico a cada muestra para corregir el PH a 1.8, posteriormente el PH se mantiene en promedio de 1.82, con tendencia a disminuir por los mecanismos de generación de  $\text{H}^+$ . En comparación al mineral S, el PH mínimo promedio al final de la segunda etapa ha sido de 1.45, mientras en el mineral K el valor ha sido de 1.7, esto por las mayores especies sulfuradas en el mineral S.



**Figura 4.22 Efecto del FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O en el ORP durante la segunda etapa para el mineral K.**

La figura 4.22 Muestra el rápido incremento de los valores de ORP en los 4 primeros días a un valor promedio de 570mV, en comparación de la primera etapa que se logró obtener dicho resultado al séptimo día. El valor de ORP a 0 g/l FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O se ha incrementado en un 4% promedio en comparación a la primera etapa. Los valores de 3g/l , 9g/l y 15g/l de FeSO<sub>4</sub>·7H<sub>2</sub>O muestran un comportamiento similar pero el efecto en la recuperación de Cobre se mostrara posteriormente.

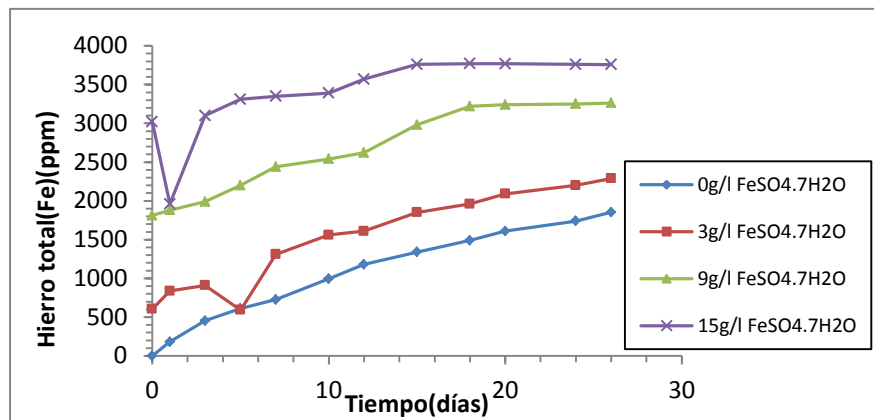
#### 4.1.2.2.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.23 Porcentaje de recuperación de cobre durante la segunda etapa para el mineral K.**

El porcentaje de recuperación de cobre a las diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  nos muestra que la máxima recuperación obtenida es de 29.56% a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . y la mínima de 21.08% a 15g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . cabe resaltar que la mayor tendencia de incremento o mayor pendiente, se ha dado en los primeros 8 días para todas las muestras. En comparación a la primera etapa, la recuperación se ha incrementado en un 4.0% para 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

#### 4.1.2.2.4 Concentración de Hierro Total (Fe).



**Figura 4.24 Concentración de Hierro Total (Fe) durante la segunda etapa para el mineral K.**

El incremento de las concentraciones de Hierro total en las soluciones lixiviadas de cada muestra, muestran una pendiente mayor respecto a la primera etapa (figura 4.12) por ejemplo para 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  se ha calculado un aumento de 129% en la tendencia de incremento. Esto debido a la mayor concentración de pulpa y las condiciones de biolixiviación con bacterias ya adaptadas en el inóculo, Para la concentración 15g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  el incremento no es proporcional a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , de acuerdo a los resultados anteriores, el efecto de saturación de hierro en la solución produce un efecto inhibitorio en las bacterias y consecuentemente en la solubilidad del hierro y el cobre.

### **4.1.3 Tercera Etapa de Biolixiviación.**

Para cada mineral, se han preparado soluciones con el medio 9K con las concentraciones de  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , (3.00g/l), KCl (0.100 g/l),  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  (0.500 g/l),  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , (0.500 g/l),  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  (0.01 g/l), modificando la concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en 0.00g/l, 2.00g/l, 4.00g/l y 6.00 g/l. Estas concentraciones han sido definidas debido a los resultados positivos en la recuperación de cobre, crecimiento biológico y solubilidad del hierro en las etapas anteriores a bajas concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  menores a 6g/l, es por el cual se ha decidido realizar la tercera etapa a las concentraciones mencionadas.

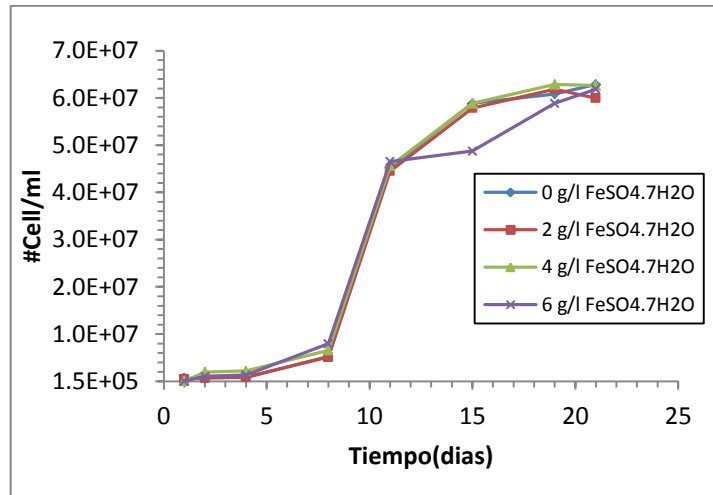
En esta etapa la densidad de pulpa se ha triplicado respecto a la segunda etapa (6%W/V), por el cual el peso de cada mineral es de 18 gramos para cada Erlenmeyer, la agitación constante de 150RPM.

El volumen de inóculo, se ha extraído de la solución de la segunda etapa, considerando que habido una adaptación biológica al mineral, el volumen inóculo ha sido de 30 ml, 10%(V/V) respecto al volumen total.

#### **4.1.3.1 Parámetros medidos para el Mineral S.**

Los parámetros medidos son los mismos respecto a la primera y segunda etapa, para obtener resultados comparativos entre etapas y posteriores conclusiones.

#### 4.1.3.1.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico.

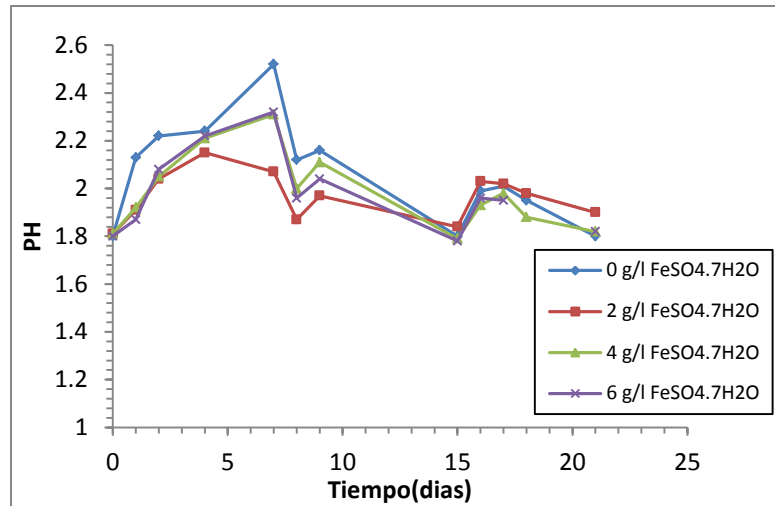


**Figura 4.25 Crecimiento biológico durante la tercera etapa para el mineral S.**

La figura 4.25 muestra el incremento de la densidad biológica para el mineral S, el inculo ha contenido una concentración de  $4.43 \times 10^7$  Cell/ml, se ha observado que las fases de adaptación y exponencial muestra la misma tendencia para todas las concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , Iniciando la fase exponencial al día 8, se ha obtenido una densidad biológica máxima de  $6.30 \times 10^7$  Cell/ml a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  respecto a las demás concentraciones y superando a la concentración del inculo en 42 %,en comparación a la segunda etapa ,no se logró superara la concentración del inculo.

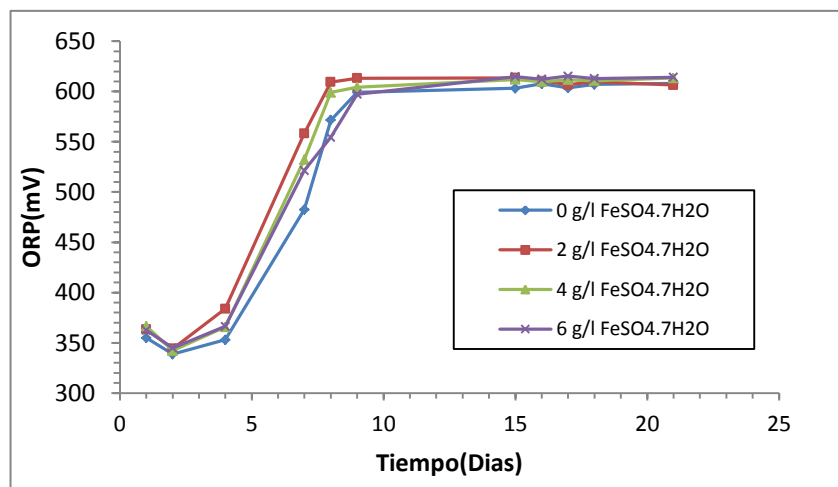


#### 4.1.3.1.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.26 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el PH durante la tercera etapa para el mineral S.**

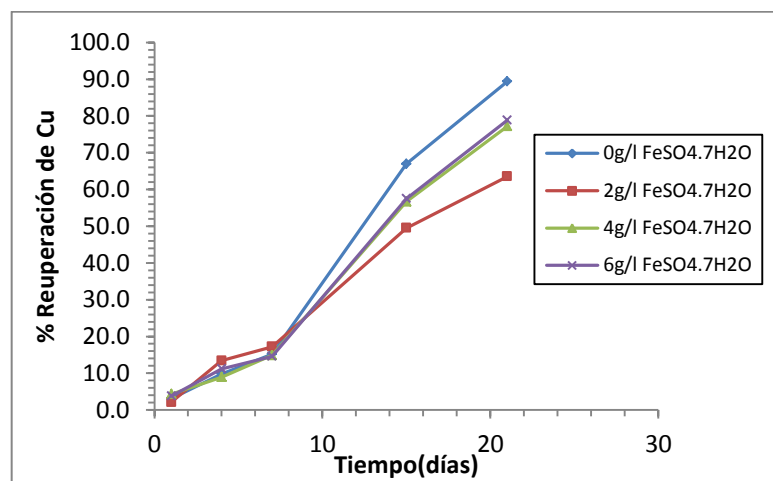
El efecto del PH del mineral muestra como resultado un incremento durante los primeros 7 días ya que la densidad de pulpa ha aumentado a 6 %, por el cual se ha agregado 5 gotas de ácido sulfúrico concentrado a cada Erlenmeyer para corregir el PH, mostrándose como resultado una disminución en los posteriores días



**Figura 4.27 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el ORP durante la tercera etapa para el mineral S.**

Los valores en la figura 4.27 Muestran el incremento del potencial redox para las diferentes concentraciones de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . El valor máximo en esta etapa es de 613.2mV a 2g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ . Se observa que los valores superan los 600mV al día 9, mientras que en la segunda etapa no se logró obtener dicho valor, concluyendo así que en esta etapa hay un mayor potencial de oxidación hacia el mineral.

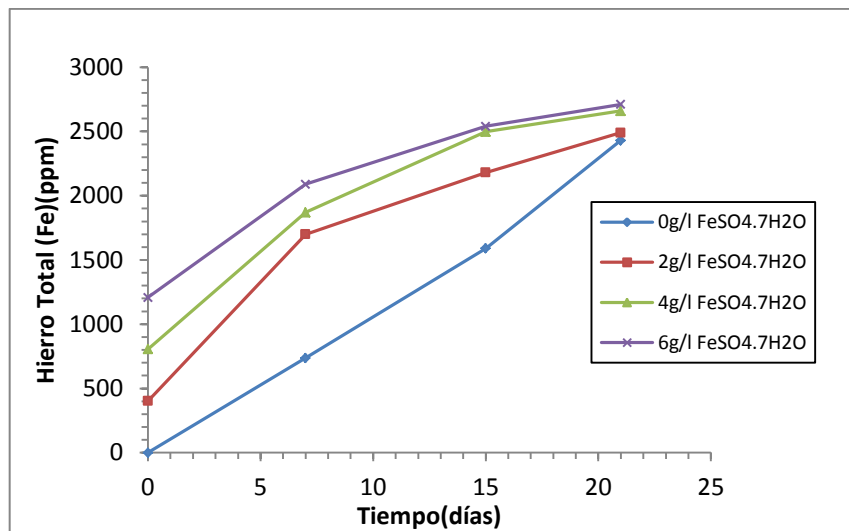
#### 4.1.3.1.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.28 Porcentaje de recuperación de cobre durante la tercera etapa para el mineral S.**

La figura 4.28 muestra claramente la recuperación máxima de esta etapa es de 89.38% a 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , 3.8 % más respecto a la segunda etapa el cual también ha sido en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ , es a partir de la segunda etapa y corroborando con la tercera etapa donde se demuestra la adaptación bacteriana al mineral en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  dando como resultados la alta recuperación de cobre mostrados.

#### 4.1.3.1.4 Concentración de hierro total (Fe).



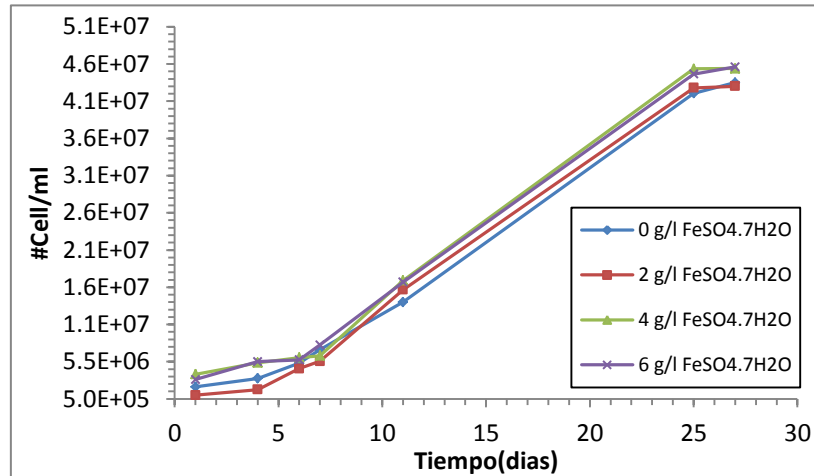
**Figura 4.29 Concentración de Hierro Total (Fe) durante la tercera etapa para el mineral S.**

La tendencia lineal en el incremento de la concentración de Hierro total en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  es mayor en aproximadamente en 25% respecto a la segunda etapa, considerando que en esta tercera etapa la concentración de pulpa es de 6%.

#### 4.1.3.2 Parámetros medidos para el mineral K.

Durante la tercera etapa, los parámetros medidos son comparados respecto a la segunda etapa considerando que se ha triplicado la densidad de pulpa a 6%(W/V) y el volumen del inóculo ha sido extraído de la segunda etapa.

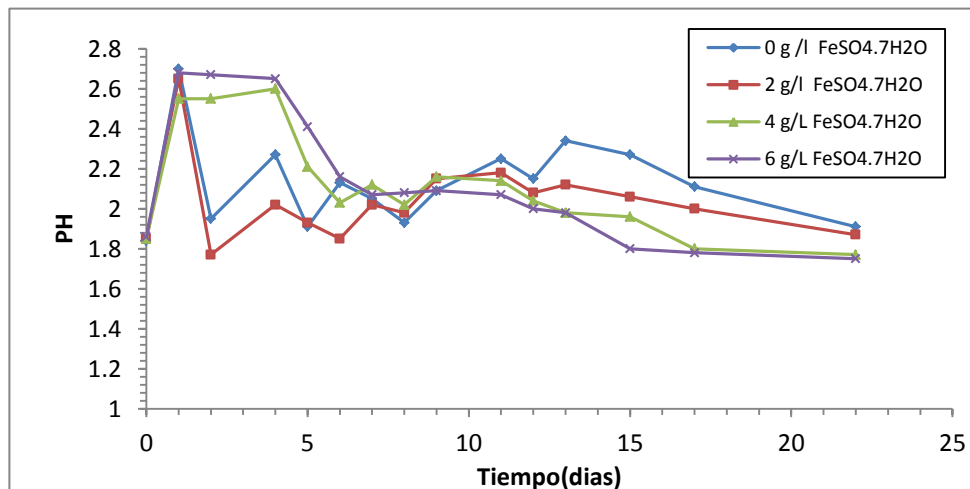
#### 4.1.3.2.1 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el crecimiento biológico..



**Figura 4.30 Crecimiento biológico durante la tercera etapa para el mineral K.**

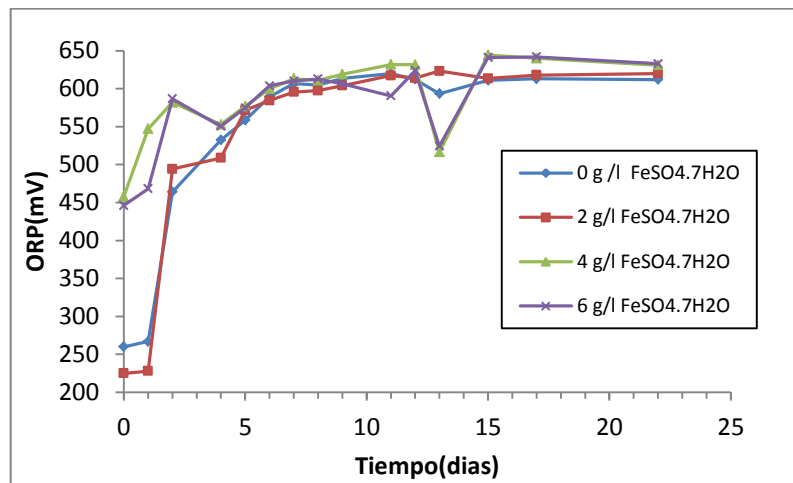
En esta tercera etapa a concentración del inóculo ha sido de  $4.05 \times 10^7 \text{ Cell/ml}$ , la concentración máxima ha sido de  $4.5 \times 10^7 \text{ Cell/ml}$  a  $6 \text{ g/l FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  solo un 4% mayor de la concentración a  $0 \text{ g/l FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en comparación a la segunda etapa, se ha logrado un incremento de 17 % en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

#### 4.1.3.2.2 Efecto del $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ en el PH y ORP.



**Figura 4.31 Efecto del  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  en el PH durante la tercera etapa para el mineral K.**

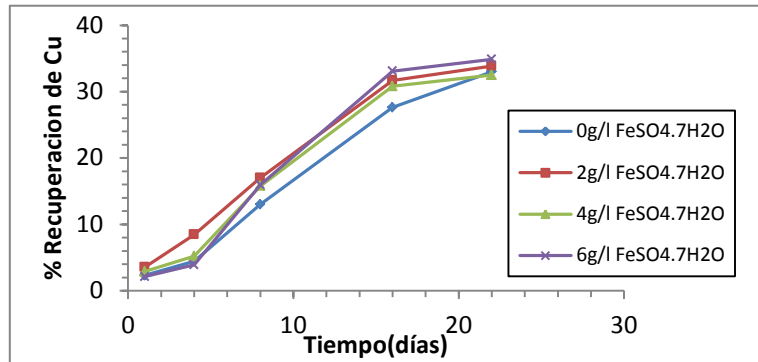
En la figura 4.31 se observa el elevado PH(2.6 promedio) al primer día de iniciado la biolixiviación, esto debido a la mayor cantidad de mineral (6% W/V) respecto a la segunda etapa, es por el cual se agregó 6 gotas de ácido sulfúrico a cada Erlenmeyer para corregir el PH, posteriormente se observa una tendencia descendente hasta llegar a un promedio de 1.85 al final de la etapa.



**Figura 4.32 Efecto del FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O en el ORP durante la tercera etapa para el mineral K.**

La variación de ORP es directamente proporcional a la segunda etapa, la diferencia es lo valores máximos registrados en esta etapa, Por ejemplo los valores registrados durante los últimos 7 días han sido entre 600mV y un máximo de 644.5mV a 4g/l FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O al día 15, mientras en la segunda etapa no se ha llegado a registrar dichos valores, esto indica el mayor potencial de oxidación hacia el mineral.

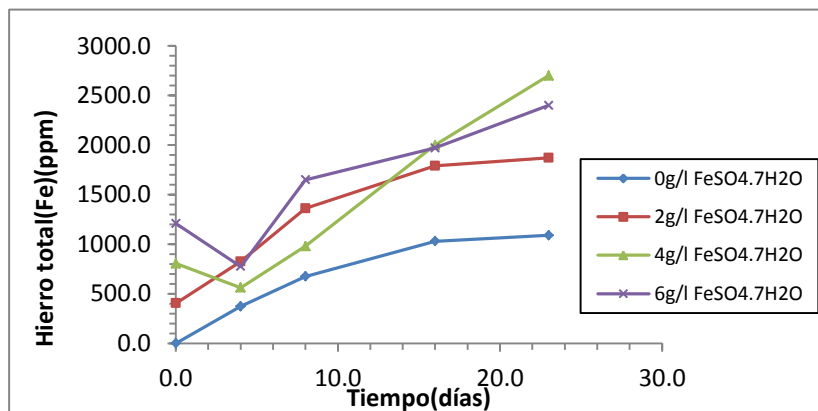
#### 4.1.3.2.3 Recuperación de Cobre (Cu).



**Figura 4.33 Porcentaje de recuperación de cobre durante la tercera etapa para el mineral K.**

Como se muestra en la figura 4.33, el porcentaje de recuperación de cobre ha sido mayor a la segunda y primera etapa, por ejemplo los valores máximos de recuperación de cobre para la muestra a 0g/l de FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O en la primera etapa ha sido 25.47%, en la segunda etapa 29.56% y en la tercera etapa 33%, considerando que en la tercera etapa la cantidad de mineral se ha triplicado respecto a la segunda etapa, estos resultados respaldan la adaptación bacteriana y mejora en el procesos de recuperación.

#### 4.1.3.2.4 Concentración de hierro total (Fe).



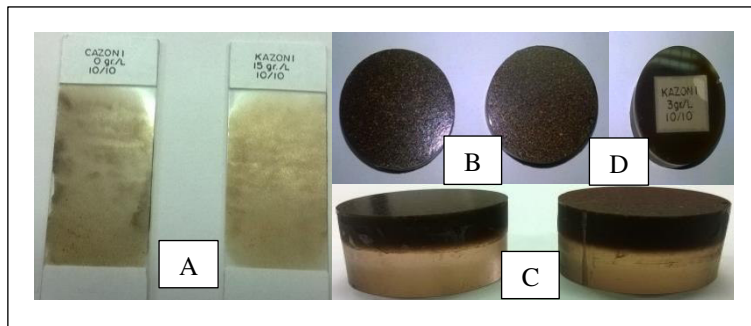
**Figura 4.34 Concentración de Hierro Total (Fe) durante la tercera etapa para el mineral K.**

Como se muestra en la figura 4.34 El aumento de concentración de hierro total en las muestras implica la solubilidad y oxidación al mineral, para esta etapa la mayor tendencia lineal ascendente respecto a las demás muestras se da a 4g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  llegando a un máximo de 2700ppm.

### 4.2 Mineralogía del mineral Biolixiviado.

El objetivo de esta prueba es dar a conocer el cambio físico de los minerales por efecto de la biolixiviación, como también la liberación del oro encapsulado en minerales de pirita, calcopirita y arsenopirita.

La mineralogía es del relave del mineral después de estar sometido a la biolixiviación.



**Figura 4.35 A- muestra del mineral K en láminas delgadas para estudio microscópico. B, D y C - vistas de las secciones pulidas para el mineral K para el estudio microscópico del mineral.**

Las secciones mostradas son el tratamiento que se les da a las muestras para realizar el estudio microscópico.

#### 4.2.1 Mineralogía al relave de la primera etapa del mineral K a 0g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Minerales	Formula	Abrev.	Volumen (%)	Grado de liberación (%)
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	cp	0.40	99.50
Esfalerita	$\text{ZnS}$	ef	0.40	100.00
Pirita	$\text{FeS}_2$	py	24.16	97.63
Arsenopirita	$\text{FeAsS}_2$	apy	0.20	100.00
Pirrotita	$\text{Fe}_{0.8-1}\text{S}$	po	1.00	100.00
Magnetita	$\text{Fe}_2(\text{Fe}_3)_2\text{O}_4$	mt	0.50	80.00
Hematita	$\text{Fe}_2\text{O}_3$	hm	0.00	0.00
Ilmenita	$\text{Fe}_2\text{TiO}_3$	il	0.10	0.00
Rutilo	$\text{TiO}_2$	rt	0.20	100.00
Goethita	$\text{A.FeO(OH)}$	gt	17.98	96.78
Gangas		GGs	55.06	99.89

**Tabla 4.1 Mineralogía al relave de la 1ª etapa de biolixiviación al mineral K a 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .**

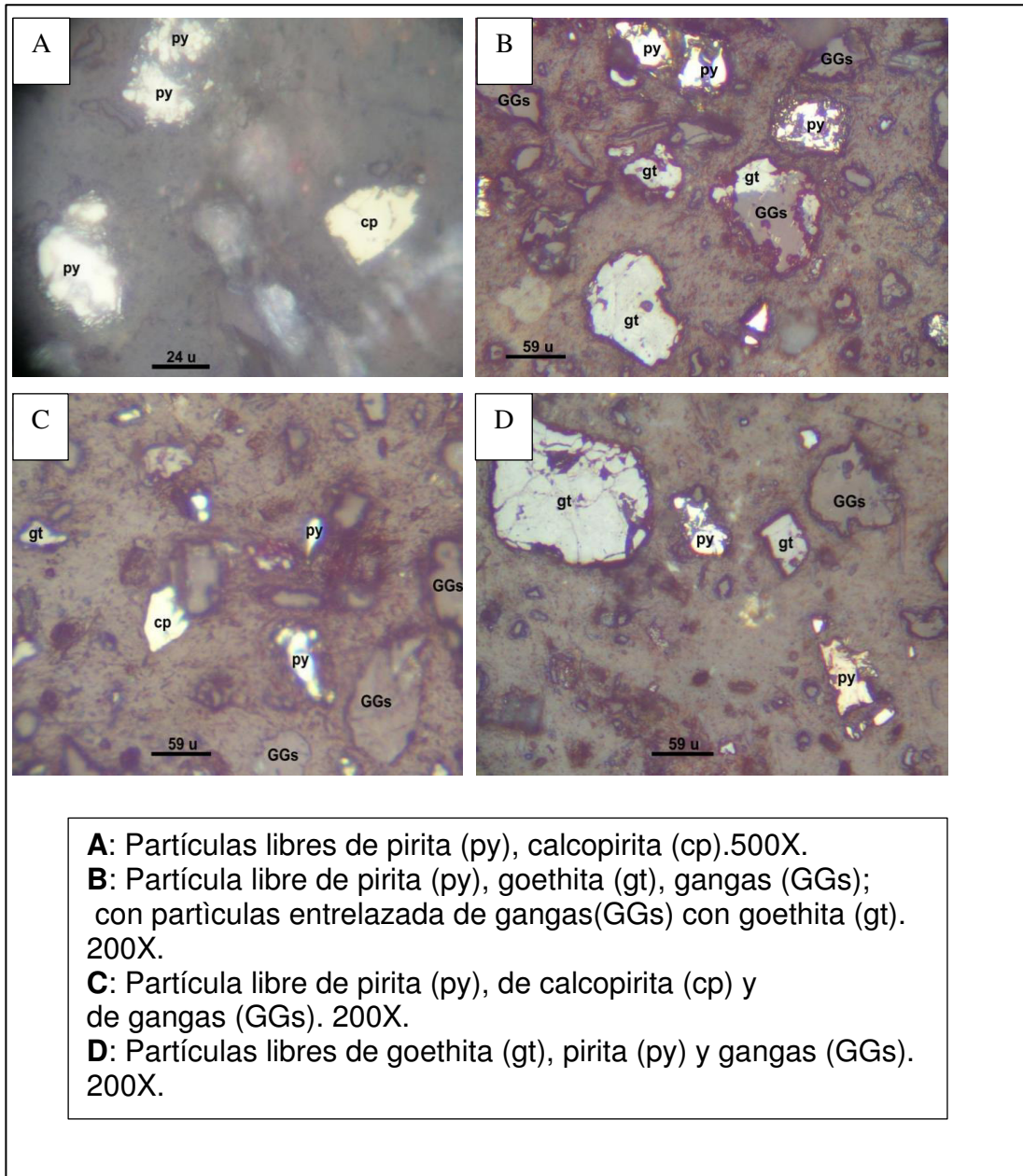
La calcopirita ocupa el 0.40% del volumen total de la muestra, de este volumen el 99.50% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 0.50% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

La pirita ocupa el 24.16% del volumen total de la muestra, de este volumen el 97.63% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 0.37% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

La arsenopirita ocupa el 0.20% del volumen total de la muestra, de este volumen el 100.00% se halla libre.



#### 4.2.1.1 Micrografías del relave del mineral K perteneciente a la 1ª etapa a 0g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .



Se observa en las micrografías el efecto de la oxidación biológica, como las partículas libres de pirita, calcopirita y otros cambios físicos en las partículas en forma grietas.

#### 4.2.2 Mineralogía al relave de la primera etapa del mineral K a 3g/l de $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

Minerales	Formula	Abrev.	Volumen (%)	Grado de liberación (%)
Oro	Au	Au	0.00	0.00
Calcopirita	$\text{CuFeS}_2$	cp	0.11	0.00
Esfalerita	ZnS	ef	0.69	0.00
Pirita	$\text{FeS}_2$	py	25.17	91.29
Pirrotita	$\text{Fe}_{1-x}\text{S}$	po	0.01	0.00
Goethita	$\text{FeO} \cdot \text{OH}$	gt	17.04	90.52
Gangas		GGS	56.98	91.94

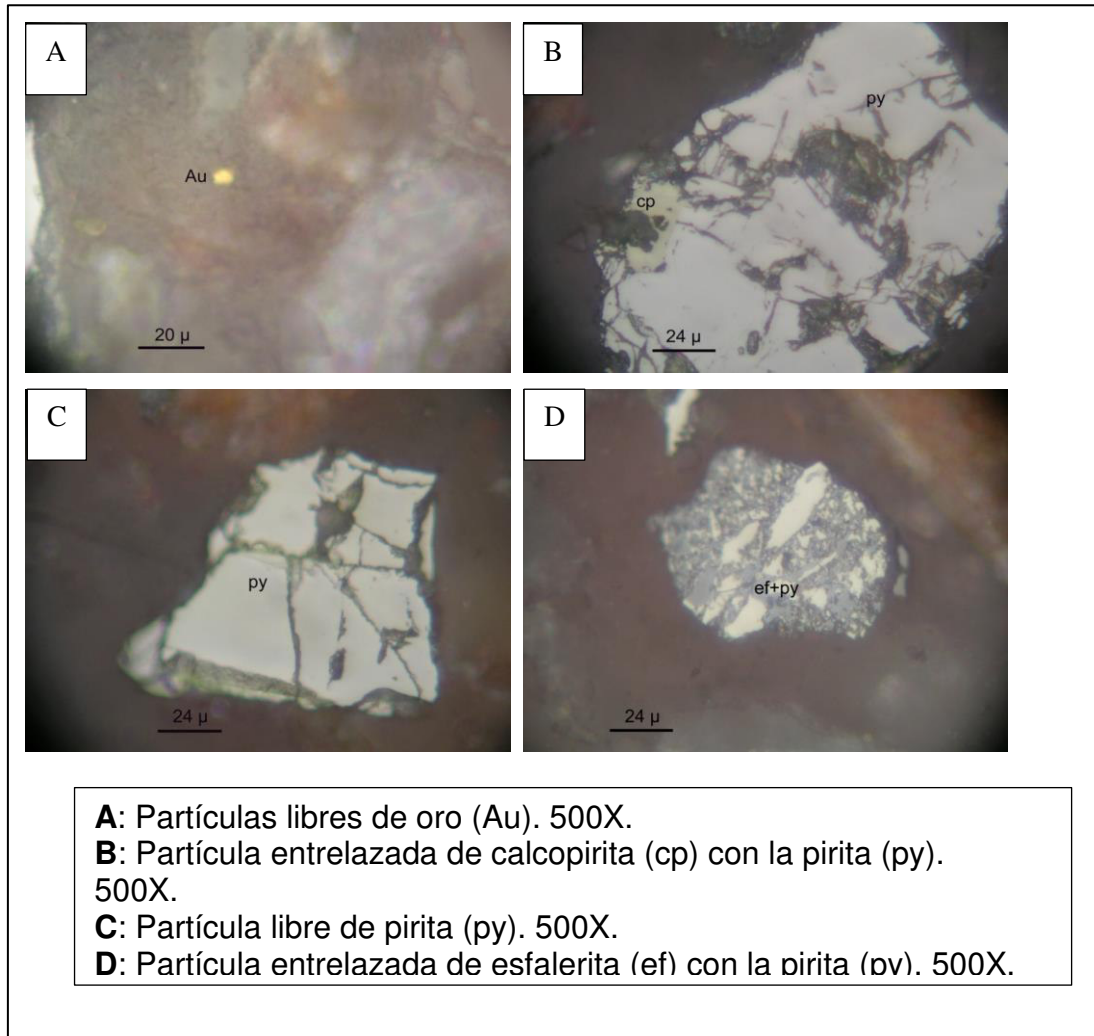
**Tabla 4.2 Mineralogía al relave de la 1ª etapa de biolixiviación al mineral K a 3g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .**

El oro se halla en el orden de trazas, es por el cual el volumen se ha considerado 0.00% respecto a las demás especies mineralógicas.

La calcopirita ocupa el 0.11% del volumen total de la muestra, de este volumen el 0.00% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 100.00%, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

La pirita ocupa el 25.17% del volumen total de la muestra, de este volumen el 91.29% se halla libre, permaneciendo aun entrelazada el 8.71% restante, el motivo por lo que no se ha liberado totalmente se debe a los diferentes tipos geométricos de entrelazamientos en los cuales están inmersos.

**4.2.2.1 Micrografías del relave del mineral K perteneciente a la 1ª etapa a 3g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .**



En la micrografía A se ha observado partícula de oro libre, el cual podemos deducir la liberación producto de la oxidación biológica, como también se muestran fisuras y cambios en las demás especies mineralógicas.

### 4.3 Disolución de arsénico(As), hierro (Fe) y azufre(S).

Los resultados a mostrar son de la solución lixiviada al final de cada etapa.

% solubilizado	Etapas de biolixiviación		
	1º etapa	2º etapa	3º etapa
%As	57.5	81.0	73.2
% Fe	44.0	57.0	35.0
%S	65.0	85.0	84.0

**Tabla 4.3 Porcentaje de disolución de As, Fe y S para el mineral K durante las 3 etapas.**

En la tabla 4.3 muestra los porcentajes de disolución de los principales elementos a considerar en el proceso de biolixiviación para el mineral K, los porcentajes de la 1ª y 2ª etapa muestran un incremento para los 3 elementos, en la tercera etapa los porcentajes son menores respecto a la 1 y 2 etapa, esto debido a que en la tercera etapa se ha considerado una mayor concentración de pulpa(6%) y como resultado se ha observado una precipitación de compuestos de azufre y otros complejos(jarrosita) los cuales no se han analizado pero si se deben considerar para posteriores investigaciones más detalladas respecto a estos mecanismos, sin embargo los datos mostrados son de gran referencia para dar soporte a la oxidación de los minerales por parte de las bacterias.

% solubilizado	Etapas de biolixiviación		
	1º etapa	2º etapa	3º etapa
%As	64.5	70.7	45.0
% Fe	32.4	35.8	28.0
%S	78.1	82.8	77.0

**Tabla 4.4 Porcentaje de disolución de As, Fe y S para el mineral S durante las 3 etapas.**

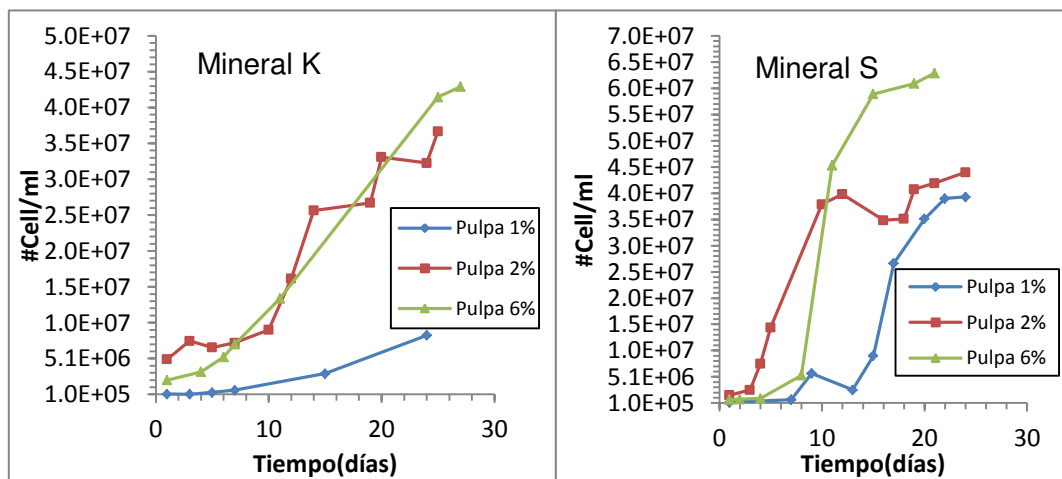
En la tabla 4.4 Los porcentajes de disolución muestran la misma tendencia de incremento en la 1ª y 2ª etapa y disminución en la 3ª etapa respecto al mineral

K, esto por las mismas condiciones y características observadas ya mencionadas para el mineral S.

#### 4.4 Efecto de la concentración de pulpa.

##### 4.4.1 Crecimiento biológico.

La adaptación biológica en las 3 etapas se muestran en las siguientes figuras para cada mineral, las muestras con correspondiente a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

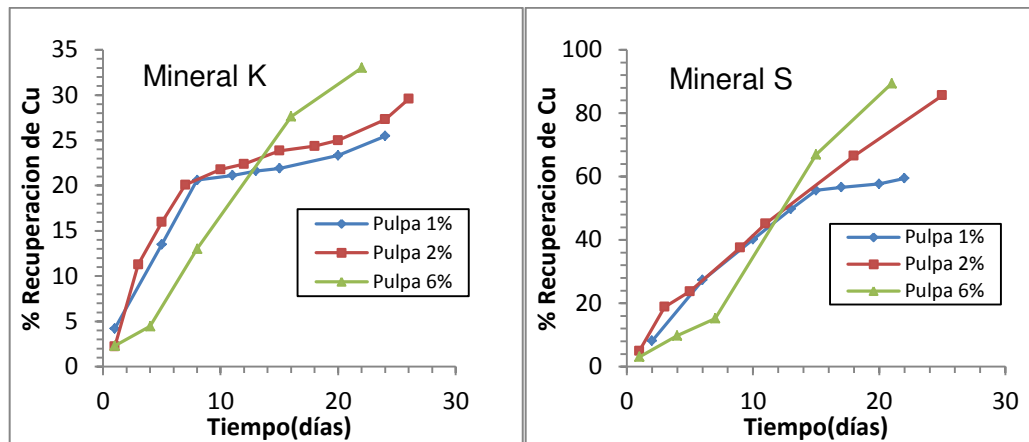


**Figura 4.36 Crecimiento biológico en las 3 etapas de biolixiviación a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .**

En la figura se observa en resumen el crecimiento biológico para ambos minerales durante las 3 etapas, en el mineral K respecto a la densidad biológica máxima se ha observado un incremento de 411% en la tercera etapa(6% pulpa) respecto a la primera(1% pulpa), correspondiente al mineral S se ha observado un incremento de 60 % en la tercera etapa respecto a la primera.

##### 4.4.2 Recuperación de cobre.

La recuperación de cobre corresponde a la muestra a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  para los minerales S y K.



**Figura 4.37 Recuperación de Cobre (%) en las 3 etapas de biolixiviación para el mineral S y K a 0g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .**

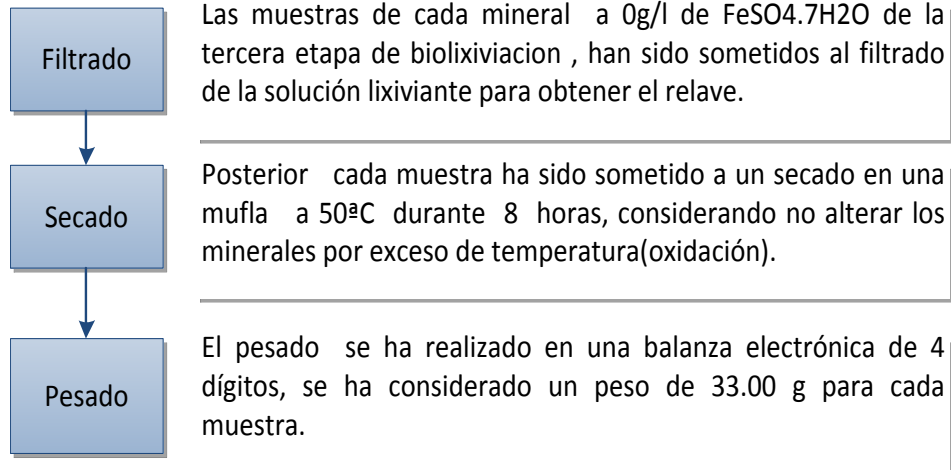
En la figura 4.37 Se observa los porcentajes de recuperación para ambos minerales S y K, para el mineral K la máxima recuperación es de 33% en la tercera etapa mientras en la primera etapa se logró recuperar el 25.4%, respecto al mineral S la máxima recuperación de 89.4% de la tercera etapa, mientras en la primera etapa se logró recuperar el 59.5%. Con respecto a ambos minerales, la diferencia en la recuperación máxima en la tercera etapa como se muestra para el mineral K el 33% y el mineral S el 89.4%, se explica por la cantidad en gangas que se ha observado en el mineral K siendo estas



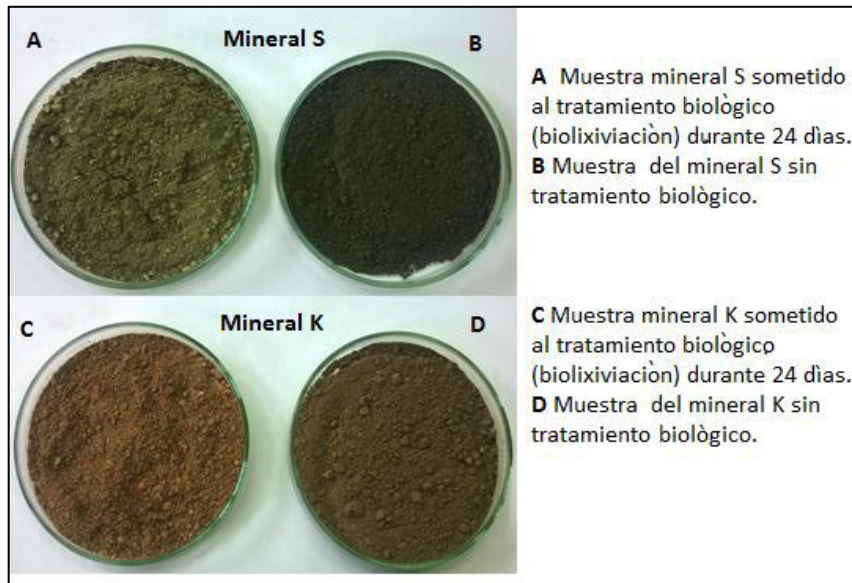
**Figura 4.38 Muestra del mineral S y K después de la tercera etapa de biolixiviación.**

los interferentes en los mecanismos de biolixiviación hacia las bacterias, el % en volumen de gangas para el mineral K y S es de 42.29% y 25.48% correspondientemente (Tabla 4.1 y Tabla 4.2).

**4.5 Proceso de Cianuración.** El proceso de cianuración se ha realizado para cuantificar el grado de recuperación para el oro posterior al tratamiento biológico sometido al mineral S y K.



Para obtener resultados comparativos de recuperación de oro y consumo de cianuro, las pruebas incluyen el tratamiento paralelo a las muestras de mineral sin tratamiento biológico.



**Figura 4.39 Muestras del mineral S y K con y sin tratamiento biológico.**



## PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Las muestras de la figura 4.39 han sido sometidos a las mismas condiciones de secado y el mismo peso de 33.00 gramos, posteriormente han sido cianuradas.

Reactivos preparados para la cianuración

- 500ml Nitrato de Plata ( $\text{AgNO}_3$ ) a 4.33g/l.
- 100ml de solución patrón de cianuro de Sodio ( $\text{NaCN}$ ) al 10%.
- 2 L Solución básica de Cal (PH 11).
- 10 ml Ioduro de Potasio (KI) al 5%.
- 200g de Cal.



Condiciones durante la prueba de Cianuración

Condiciones	
PH	10.5-10.8
Sólidos	25%
Agitación	200RPM
Concentración de Cianuro	1000ppm
Volumen Total	132 ml



### 4.5.1 Procedimiento.

Debido a las muestras sometidas al proceso de biolixiviación a condiciones de PH ácido(1.8) ,por tal motivo es necesario el acondicionamiento mediante solución básica y agregado de cal hasta un PH 10.6 , Durante el acondicionamiento se ha experimentado que las muestras sometidas a biolixiviación han requerido mayor cantidad de cal respecto a las muestras sin tratamiento biológico para acondicionar al PH final.

Cantidad de cal requerida para el acondicionamiento del PH			
Mineral	Muestra con tratamiento biológico	Muestra sin tratamiento biológico	%
Mineral S	0.316g	1.033g	226.9
Mineral K	0.338g	0.975g	188.46

**Tabla 4.5 Cantidad de cal para el acondicionamiento de las muestras a PH 10.6**



Se ha agregado la solución básica de cal hasta un volumen de 130.68 ml posteriormente se ha agregado 1.32 ml de solución patrón al 10% de NaCN equivalente a 1000ppm de NaCN en la muestra y completando así el volumen final de 132 ml.

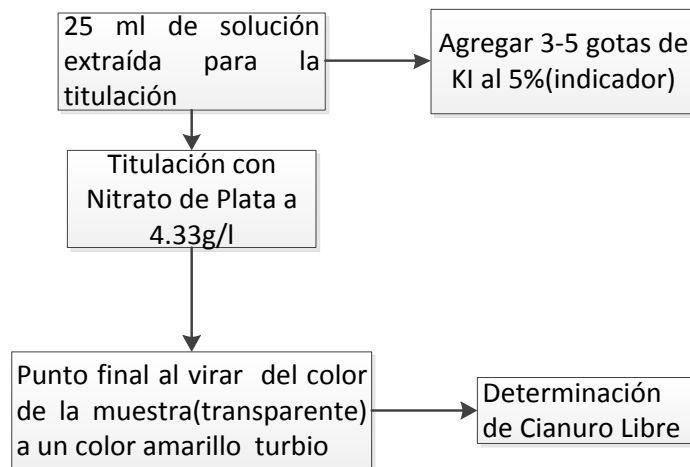
### **4.5.2 Criterios durante las pruebas de cianuración.**

Considerando mantener constante la concentración de cianuro a 1000 ppm, el volumen total de 132 ml y el control de PH en rango(10.5-10.8) se han considerado los siguientes criterios.

#### **4.5.2.1 Concentración de cianuro constante.**

Durante la prueba es sabido el consumo de cianuro libre para acomplejar el oro, como también por especies consideradas cianicidas como el arsénico y otros constituyentes ácidos del mineral que descomponen la solución de cianuro en ácido cianhídrico, otro factor que afecta a la descomposición de soluciones de cianuro es el dióxido de carbono en el aire. Entonces para mantener la fuerza de cianuro constante se ha establecido analizar la concentración de cianuro libre en la muestra en un determinado tiempo establecido durante la prueba.

Se ha optado por un procedimiento para la determinación de cianuro libre y por diferencia respecto a la concentración inicial (1000ppm) podemos conocer la cantidad de cianuro consumido, esta cantidad tiene que ser repuesta por la solución patrón de 10% de NaCN, el volumen de reposición va ser equivalente a la concentración consumida, es así por el cual se va mantener constante la concentración de cianuro a 1000ppm.



**Figura 4.40 Procedimiento para la determinación de cianuro libre**

#### 4.5.2.2 Volumen constante durante la prueba de cianuración.

Para mantener el volumen constante durante la pruebas de cianuración se ha prepara la solución básica de cal (PH 10.5-10.8) el cual se ha repuesto los volumen equivalentes al extraído para la titulación como los extraídos para los análisis de posteriores de oro.

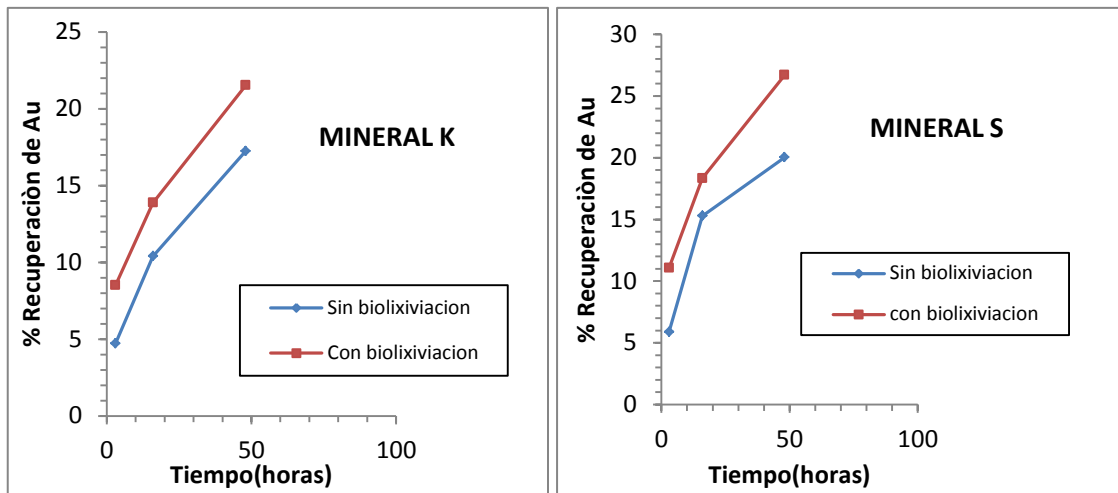
#### 4.5.2.3 Agregado de Cal.

El agregado de cal es muy importante no solo para evitar la pérdida de cianuro por hidrolisis sino también para neutralizar otros constituyentes ácidos del mineral el cual liberaría ácido cianhídrico (*Fidel S., 2010*), durante la etapa se ha controlado el PH continuamente y de acuerdo a las mediciones de ha agregado cal, de esta manera se ha mantenido en rango de 10.5-10.8.

Consumo total de cianuro durante la prueba			
Mineral	Muestra con tratamiento biológico	Muestra sin tratamiento biológico	% ahorro
Mineral S	0.4356g	0.50952g	16.96%
Mineral K	0.38808g	0.41844g	7.82%

**Tabla 4.6 Consumo total de Cianuro.**

#### 4.5.2 Recuperación de Oro (Au) para los minerales S y K.



**Figura 4.41 Comparación en porcentaje de recuperación de oro(Au) para los minerales K y S en durante la cianuración.**

En la figura 4.41 se muestra el porcentaje de recuperación de oro para los minerales K y S, durante las 48 Horas del proceso de cianuración, para el mineral K la máxima recuperación para la muestra pre-tratada por el proceso de biolixiviación ha sido de 21.51%, dicha recuperación es 4.27% más respecto a la máxima recuperación obtenida en la muestra sin ser sometido al tratamiento biológico (17.24%). Para el mineral S, la máxima recuperación en la muestra pre-tratada por el proceso de biolixiviación ha sido de 26.69%, dicha recuperación es 6.67% más respecto a la máxima recuperación obtenida en la muestra sin ser sometido al tratamiento biológico (20.02%). Los resultados muestran indirectamente efecto oxidante de las bacterias hacia los minerales como la pirita, calcopirita, arsenopirita, etc. y como resultados la liberación del oro por el cual facilita la extracción mediante la cianuración, Si bien no se ha llegado a obtener recuperaciones elevadas (>90%) por la limitada cantidad de muestra para los ensayo prueba error, Es importante contribuir cuantitativamente la diferencia entre ambos procesos y la referencia para futuros proyectos.

## **DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

La caracterización mineralógica realizada a los minerales, nos muestra los compuestos mineralógicos que componen, como son calcopirita, arsenopirita, pirita etc. Como también partículas de oro ocluidos entre las matrices de los compuestos mencionados, siendo el motivo por el cual se ha realizado procesos como la Cianuración para su recuperación.

En la primera etapa de biolixiviación como etapa de adaptación, para el mineral S el inicio de la etapa exponencial del crecimiento se da el día 7, posteriormente con tendencia estacionaria al día 25, estableciéndose así como dato referencial para las posteriores etapas, el pH se ha mantenido en promedio de 1.8, con tendencia a generar mayor acidez en los últimos días, esto debido a la generación de  $H^+$ .

En el caso de ORP se observa un incremento en los días 5, el cual corrobora el inicio del crecimiento biológico y el proceso de oxidación del mineral, se ha alcanzado valores de 575mV promedio para todas las muestras, Respecto al mineral K, la tendencia de crecimiento biológico en los días respecto al mineral S son similares, el crecimiento biológico promedio del mineral S es 67 % mayor respecto al mineral K esto debido a la naturaleza sulfurada del mineral S. EL pH se mantenido en promedio de 1.8, la recuperación máxima de cobre alcanzada es de 25.6 % a 12g/l de  $Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$ , el cual es 47% menos que la recuperación máxima obtenido para el mineral S a 6g/l de  $Fe_2SO_4 \cdot 7H_2O$ .

En la segunda etapa, al duplicar la densidad de pulpa (2%W/V), la adaptación biológica se ha reducido en un 50%, como también el pH en los últimos días se incrementó la tendencia de acidificación debido a la mayor generación de  $H^+$ , la recuperación de cobre se ha incrementado en 26.15% respecto a la primera etapa en ausencia de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , el incremento lineal de la concentraciones de hierro total, cuantitativamente nos proporciona la oxidación del Fe del mineral a  $Fe^{3+}$  incrementándose la concentración de Hierro Total para todas las concentraciones de  $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ , Respecto al mineral K, el incremento de adaptación biológica,

la tendencia de acidificación de las muestras y el incremento del potencial de oxidación se ha observado en la misma proporción respecto al mineral S. La recuperación de Cobre máxima en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  es de 29.56%, siendo 4.5% más respecto al mínimo obtenido a 15g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .

En la tercera etapa se ha triplicado al densidad de pulpa a 6%(W/V), la mayor cantidad de mineral sulfurado biolixiviado con el consorcio biológico ya adoptado en las etapas anteriores, se han obtenido resultados favorables en el incremento de la recuperación de cobre en ausencia de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  hasta 89.38%, respecto al pH se incrementó la tendencia acidificadora como también la similar tendencia de incremento de los valores de ORP en las diferentes muestras, representan la mayor oxidación del mineral respecto a las etapas anteriores.

La disolución del mineral en el proceso de biolixiviación genera el incremento del hierro y azufre los cuales son un medio de sustrato para el consorcio biológico.

El arsénico proporciona un efecto inhibitor al crecimiento biológico a elevadas concentraciones en el mineral, pero puede ser oxidado el mineral contenido de arsénico (arsenopirita) mediante etapas de adaptación.

En la tablas 4.3 y 4.4, en la 1ª y 2ª etapa hay un incremento de disolución de los elementos (Fe, S y As), mientras en la 3ª etapa, se muestra un ligero descenso, esto debido al incremento de la pulpa respecto a las primeras etapas. Se ha observado la generación de precipitados de azufre (jarrosita) (Luis G., Debora, 2011) y otros complejos los cuales no se han logrado analizar, pero las conclusiones obtenidas de los resultados dan soporte para próximas investigaciones

La micrografías realizadas al mineral biolixiviado (Relave), muestran visualmente la oxidación y cambio físico-químico sufrido durante el mencionado proceso. En las micrografías del relave post-tratamiento, se muestra partículas de oro libre, es por el cual se ha procedido continuar el

proceso para la recuperación del oro mediante la cianuración y de esta manera cuantificar la recuperación de oro en los procesos con y sin tratamiento biológico.

En las figuras 4.36 se muestra la variación de la densidad de pulpa en las 3 etapas de 1%, 2% y 6% (W/V) respecto al crecimiento biológico, claramente el mayor crecimiento biológico se ha dado a 6% de pulpa ya que se ha trabajado con inóculos adaptados en las etapas anteriores, cabe resaltar que es en ausencia del sustrato principal ( $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ) por el cual se deduce que el sustrato de  $\text{Fe}^{2+}$  es adquirido del mineral, similar tendencia ha resultado en la recuperación de cobre para ambos minerales (S y K), obteniéndose mayor recuperación a 6% de pulpa.

El efecto de las gangas se muestra en la figura 4.38, al contener diversos elementos (silicatos, arcilla, etc.) que a concentraciones determinadas generan inhibición en la oxidación biológica, esto se muestra en los resultados de recuperación de cobre durante el proceso de biolixiviación, ya que se ha trabajado a las mismas condiciones para ambos minerales, el % en volumen de gangas para el mineral K y S es de 42.29% y 25.48% respectivamente, esto indica las consideraciones importantes a tener en cuenta el % de gangas y su composición.

La recuperación de Oro se ha realizado mediante el proceso de cianuración, en las figuras 4.41 se muestra el porcentaje de recuperación.

Para ambos minerales se ha obtenido una recuperación de 5% más de oro en un mineral con tratamiento biológico respecto a un mineral sin tratamiento biológico, si bien no se ha alcanzado recuperaciones elevadas ( $>60\%$ ), pero sigue la tendencia de incremento, además el objetivo principal planteado ha sido de cuantificar el beneficio del proceso preliminar de tratamiento biológico antes de la Cianuración.

**CONCLUSIONES**



## CONCLUSIONES

---

- Las bacterias se han adaptado y desarrollado adecuadamente a los minerales tratados de diferentes procedencias referentes a lugar de aislamiento.
- Un crecimiento biológico máximo alcanzado por bacterias si ser adaptadas previamente al mineral, no nos garantiza una recuperación máxima de Cobre.
- La concentración de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  óptima para el mineral S en la primera etapa ha sido de 6g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  alcanzándose la máxima recuperación de Cu (72.64%). Para el mineral K el máximo crecimiento biológico ha sido a 15 g/l  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  mientras que la máxima recuperación de cobre se ha dado a 9 g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ .
- El potencial oxido reducción (ORP) registrado en un Rango promedio de 585-620 mV durante las pruebas, indican el inicio del crecimiento exponencial biológico en dichas pruebas.
- La generación de  $\text{H}^+$  como  $\text{H}_2\text{SO}_4$  ha logrado amortiguar el medio ácido a un PH promedio de 1.8 en todas las pruebas, como también se ha observado un descenso a finales de dichas pruebas.
- El efecto biooxidante para el oro en lo minerales sulfurados de cobre se ha demostrado con la observación de la liberación del oro (micrografías) y posterior proceso de recuperación del oro mediante la cianuración.
- El Pre- tratamiento biológico para minerales sulfurados auríferos incrementa el uso de cal pero disminuye el uso de cianuro e incrementa la recuperación de oro.
- En minerales sulfurados refractarios, la biolixiviación es ventajosa respecto a la lixiviación química para densidades de pulpa mayores a los 2%.
- El incremento de la disolución de As, Fe, y S en las etapas de biolixiviación muestran la oxidación biológica hacia las diferentes especies mineralógicas.

## CONCLUSIONES

---

- Las gangas es un factor importante a considerar en la recuperación de cobre.
- El proceso hacia minerales sulfurados con elevadas concentraciones de hierro (Fe) con bacterias previamente adaptadas, no hay necesidad de agregar  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  como nutriente.

**RECOMENDACIONES**

- Escalamiento de las operaciones unitarias para la evaluación y optimización de variables operativas y/o de control. Desarrollándose cooperación entre las universidades y las empresas mineras que poseen y explotan los recursos minerales.
- Ampliar los rangos de las condiciones del proceso ( pH ,concentración de sustrato, densidad Biológica ,caracterización química del mineral, etc) Tomando como referencia los realizados en este trabajo, de esta manera ampliar los estudios de biolixiviación.
- Estudio del acondicionamiento biológico a las condiciones ambientales (bajas temperaturas) presentes en las zonas de los recursos minerales del Perú.
- Realizar estudios para procesos catalizantes ( enzimas ) que proporcionen una mayor cinética hacia el proceso de biolixiviación a bajas temperaturas y/o a condiciones adversas para las bacterias.
- Promover y desarrollar el conocimiento tecnológico en el Perú para las mejoras en los procesos aplicados a la minería.

**REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Acevedo F., Gentina J. C.** 2005. *Biolixiviación de minerales de cobre*. In: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras*. p 14-43.
- Adamson, R. J.** 1972. *The chemistry of the extraction of gold from. Its ores, Ch. In gold metallurgy in South Africa*. Cape and Transual printers Ltd. Cap.2, south Africa,
- Angel Azañero.O ,2001,** *Recuperación De Oro Y Plata De Minerales Por Heap Leaching*, Revista del Instituto de investigación de la Facultad de Geología, Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas-UNMSM, Vol 4, N°7.
- Barrett, J., M.N. Hughes, G.I. Karavaiko and P.A. Spencer,** 1993,*Metal extraction by bacterial oxidation of minerals*, Ellis Horwood, Chichester.
- Brandl, H.,** 2001. *Microbial leaching of metals*. In: Rehm, H.J., Reed, G. (Eds.), *Biotechnology, . In: Special Processes*, vol. 10, pp. 191–224.
- Brierley J.A. and Brierley C.L,** 2001., *Present and future commercial applications of biohydrometallurgy*, *Hydrometallurgy*, 59, 233-239 .
- Brierley C.L.**2010, *Biohydrometallurgical prospects*, *Hydrometallurgy*, 104, 324-328.
- Brierley C.L.**2008, *How will biomining be applied in future?*, *Science Direct* , 1302-1310
- Butts A.** *Copper: the science and technology of the metal, its alloys and compounds*, 1970.Pags 300-311
- Celep, O. & Alp, I. & Deveci, H.** 2011, *Improved Gold and Silver Extraction from a Refractory Antimony Ore by Pretreatment with Alkaline Sulphide Leach*. *Hydrometallurgy*, Vol 105, pp. 234-239.
- Chandra S. Ghan, Haragobinda S., Dong-J. Kim ,**2012.*Biohydrometallurgy and Biomineral Processing Technology: A Review on its Past, Present and Future*. *Research Journal of Recent Sciences* .Vol. 1(10), PP.85-99.

- Cochilco. Comisión Chilena de Cobre**,2009.*Biolixiviación: Desarrollo actual y su expectativas. PP. 1-27.*
- Coram NJ, Rawlings**, 2002, *Molecular relationship between two groups of Leptospirillum and the finding that Leptospirillum ferriphilum sp. nov. dominates South African commercial biooxidation tanks which operate at 40°C.* Appl Environ Microbiol 2002, 68:838-845.
- Das T, Ayyappan S, Chaudhury G.R.** 1999. *Factors affecting bioleaching kinetics of sulfide ores using acidophilic micro-organisms.* BioMetals, 12. 1-10.
- Demergasso, C.; Galleguillos, F.; Soto, P.; Serón, M. And Iturriaga, V.** (2009). *Microbial succession during a heap bioleaching cycle of low grade copper sulphides: Does this knowledge mean a real input for industrial process design and control?* Hydrometallurgy, vol. 104, no. 3-4, p. 382-390.
- Deveci H.** 2002. *Effect of solids on viability of acidophilic bacteria.* **Minerals Engineering**, Vol. 15. 1181-1189.
- Deveci H.** 2004. *Effect of particle size and shape of solids on the viability of acidophilic bacteria during mixing in stirred tank reactors.* **Hidrometallurgy**, Vol. 71. 385-396.
- Dew, D.W.** 1995. *Comparison of performance for continuous biooxidation of refractory gold ore flotation concentrates. In Biohydrometallurgical Processing Vol. 1: Proceedings of the International Biohydrometallurgy Symposium IBS-95, held at Viña del Mar, Chile ed. Universidad de Chile, pp. 239–251, ISBN: 956-19-0209-5.*
- Douglas E Rawlings**,2005 *Characteristics and adaptability of iron- and sulfur-oxidizing microorganisms used for the recovery of metals from minerals and their concentrates.* Microbial Cell Factories. 2005, 4:13 Pág. 2-7.

**Domic E.** *Hidrometalurgia: Fundamentos, procesos y aplicaciones*, 2001  
Pag.140

**Donati Edgardo R., Sand Wolfgang** ,2007. *Microbial Processing of Metal Sulfides*, Springer . ISBN 978-1-4020-5588-1.

**Edelbro R, Sandström A, Paul J.** 2003. *Full potential calculations on the electron bandstructures of spalerite, pyrite and chalcopyrite*. Appl Surf Sci 206: 300-313

**Foucher S, Battaglia-Brunet F, d'Hugues P, Clarens M, Godon JJ, Morin D**,2003: *Evolution of the bacterial population during the batch bioleaching of a cobaltiferous pyrite in a suspended-solids bubble column, and comparison with a mechanically-agitated reactor*. Hydrometallurgy 2003, 71:5-12.

**Goebel BM, Stackebrandt E** ,1994: *Cultural and phylogenetic analysis of mixed microbial populations found in natural and commercial bioleaching environments*. Appl Environ Microbiol 1994, 60:1614-1621.

**Gómez, J.M. y Cantero D.** 2005. *Biooxidación del ión ferroso*. In: Fernando Acevedo y Juan Carlos Gentina (Editores). *Fundamentos y Perspectivas de las Tecnologías Biomineras*. 25-43.

**Groudev . S. N.** 1990 *Microbiological Transformations of mineral Raw Materials*. Tesis Doctoral en Biología .University of Mining and Geology, Sofia, Bulgaria.

**Groudev et al.**, 1983, Groudev S.N., Groudeva V.I., Genchev F.N., Petrov E.C., Mochev O.J., *Removal of iron from sands by means of microorganisms*, *Progress Biohydrometall.*, 1983, 441 – 450.

**Habashi, F.** 1999. *Textbook of Hydrometallurgy*. Quebec City, Canada.

**Hallberg KB, Lindström EB**, 1994: *Characterization of Thiobacillus caldus sp. nov., a moderately thermophilic acidophile*. Microbiology 1994, 140:3451-3456.



- Hiroyoshi, N., Hirota, M., Hirajima, T., Tsunekawa, M.,** 1997. *A case of ferrous sulfate addition enhancing chalcopyrite leaching*. Hydrometallurgy 47, 37–45.
- Hiroyoshi, N., Miki, H., Hirajima, T., Tsunekawa, M.,** 2000. *A model for ferrous-promoted chalcopyrite leaching*. Hydrometallurgy 57, 31–38.
- Hiroyoshi, N., Miki, H., Hirajima, T., Tsunekawa, M.,** 2001. *Enhancement of chalcopyrite leaching by ferrous ions in acidic ferric sulfate solutions*. Hydrometallurgy 60, 185–197.
- Hurahuac, L., Lizama, H.M. and Suzuki, I.,** 2000. *Selective Inhibitions of the oxidations of ferrous Iron or Sulfur in thiobacillus ferrooxidans*. Appl. Environ. Microbiol. 66, 1031–1037.
- H.R. Watling,** 2006. *The bioleaching of sulphide minerals with emphasis on copper sulphides*. Elsevier / Hydrometallurgy. PP 84–108.
- Kondos, P.D. & Desch enes, G. & Morrison, R.M.** 1995 *Process Optimization Studies in Gold Cyanidation*. Hydrometallurgy, Vol 39, pp. 235–250. Ref. Shrivathammavut, W. (2008).
- Kuenen, J. G., Robertson, L. A. & Tuovinen, O. H.** 1992. *The genera Thiobacillus, Thiomicrospira and Thiosphaera*. In *The Prokaryotes*, 2nd edn, pp. 2638–2657. Edited by A. Balows, H. G. Tr per, M. Dworkin, W. Harder & K.-H. Schleifer. New York: Springer.
- Ling, P. et al.** 1996. *An improved Rate Equation for Cyanidation of a Gold Ore*. Canadian Metallurgical Quarterly, Vol 35, No 3, pp. 225–234.
- Lizama, H.M. and Suzuki, I.** 1989. *Rate equations and kinetic parameters of the reactions involved in pyrite oxidation by thiobacillus ferrooxidans*. Appl. Environ. Microbiol., 55: 2918–2920.
- Luis G., Debora, M., Carlos E. G.** 2011 *Biohydrometallurgy Processes: a Practical approach*. 1:6–7

- Lundgren, D.G., Silver, M.,** 1980. *Ore leaching by bacteria*. Annu. Rev. Microbial. 34, 263–283.
- Martha E. Ly Arrascue, Jan van** ,2006. *Biooxidation of arsenopyrite concentrate using BIOX® process: Industrial experience in Tamboraque, Peru* Hydrometallurgy 83 (2006) 90–96.
- Miller G., Newton T.** *Copper head leach testing, interpretation and scale up*. ALTA copper Hydrometallurgy Forum , QLLD 1999.
- Muñoz, J.A., Gonzalez, F., Blazquez, M.L., Ballester, A.,** 1995. *A study of the bioleaching of a Spanish uranium ore. Part I: A review of the bacterial leaching in the treatment of uranium ores*. Hydrometallurgy 38, 39–57.
- Murr, L.E., Brierley, J.A.,** 1978. *The use of large-scale test facilities in studies of the role of microorganisms in commercial leaching operations*. In: Murr, L.E., Torma, A.E., Brierley, J.A. (Eds.), *Metallurgical Applications of Bacterial Leaching and Related Microbiological Phenomena*. Academic Press, New York, pp. 491–520.
- N. Pradhan , K.C. Nathsarma, K. Srinivasa Rao, L.B. Sukla, B.K. Mishra,** 2008. *Heap bioleaching of chalcopyrite*. Elsevier . Minerals Engineering 21, PP.355–365.
- Okamoto, H., Nakayama, R., Tsunekawa, M., Hiroyoshi, N.,** 2003. *Improvement of chalcopyrite leaching in acidic sulfate solutions by redox potential control*. In: Riveros, P.A., Dixon, D., Dreisinger, D.B., Menacho, J. (Eds.), *Copper-Cobre 2003 (Santiago) Volume VI—Hydrometallurgy of Copper (Book 1) Leaching and Process Development*. Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, Montreal, pp. 67–81.
- Ossa M.** 2004. *Biolixiviación de sulfuros (pirita-arsenopirita) utilizando cepas nativas de acidófilos como pretratamiento, para el beneficio de metales preciosos, mina El Zancudo, Titiribí, Antioquia*. Tesis de Maestría, Biotecnología. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ciencias.

- Parga, J.R. & Valenzuela, J.L. & Cepeda T, F.** 2007. *Pressure Cyanide Leaching for Precious Metals Recovery*. JOM, October 2007, pp. 43-47.
- Rawlings, D.E.** 1997, *Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes*, Springer-Verlag, Berlin
- Ritchie, A.,** 1997. *Optimization of biooxidation heaps*. In: Rawlings, D. (Ed.), *Biomining: Theory, Microbes and Industrial Processes*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York, pp. 211–226.
- Rodríguez, Y.,** 2000. *Tesis Doctoral: “Contribución al estudio del mecanismo de biolixiviación de distintos sulfuros metálicos con bacterias mesófilas y termófilas”*. Universidad Complutense, Madrid, España.
- Rossi, G.** 1990. *Biohydrometallurgy*. McGraw-Hill Book Company. 609 p. ISBN 3-89028-781-6.
- Rossi G.** 2001. *The design of bioreactors*. **Hidrometallurgy**. Vol. 59. 217-231
- S. Mxinwa, R. Huberts, M. Belaid,** 2012. *Process Parameters for Bio-oxidation of Sulphur in the Pre-treatment of Bioleaching Residues Destined for Cyanide Gold Extraction*. Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. PP. 1-5
- Sand, W., Gehrke, T., Hallmann, R.,** 1995. *Sulfur chemistry, biofilm, and the (in) direct attack mechanism a critical evaluation of bacterial leaching*. Appl. Microbiol. Biotechnol. 43, 961–966.
- Sand W, Gehrke T, Jozsa P-G, Schippers A.** 2001. *(Bio)chemistry of bacterial leaching – direct vs. indirect bioleaching*. Hydrometallurgy 59: 159-175.
- Shrithammavut, W.** 2008 *Modelling of Gold Cyanidation*. Master of Science Thesis, Lappeenranta University of Technology.
- Schippers A, Rohwerder T, Sand W** 1999: *Intermediary sulfur compounds in pyrite oxidation: implications for bioleaching and biodepyritization of coal*. Appl Microbiol Biotechnol, 52:104-110.

- Schippers A, Sand W.** 1999. *Bacterial leaching of metal sulfide proceeds by two indirect mechanisms via thiosulfate or via polysulfides and sulfur.* Appl Environ Microbiol 65: 319-321.
- Schippers A.** 2004. *Biogeochemistry of metal sulfide oxidation in mining environments, sediments and soils.* In: Amend JP, Edwards KJ, Lyons TW, eds. Sulfur biogeochemistry – Past and present. Special Paper 379, Geological Society of America, Boulder, Colorado, 49-62.
- Simo Keskinen,**2013 *Comparison of cyanide and thiosulphate leaching for gold production,* Bachelor of Science (Technology) Thesis
- Torma, A.E.,** 1977. *The role of Thiobacillus ferrooxidans in hydrometallurgical processes.* Adv. Biochem. Eng. 6, 1–37.
- Tributsch H, Bennett JC.** 1981. *Semiconductor-electrochemical aspects of bacterial leaching. I. Oxidation of metals. J Chem Technol Biotechnol* 31:565-577.
- van Aswegen, P.C., Marais, H.J.,** *Advances in the application of the BIOX® process for refractory gold ores.* . In: Kawatra, S.K., Natarajan, K.A. (Eds.), Mineral Biotechnology Microbial Aspects of Mineral Beneficiation, Metal Extraction, and Environmental Control. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.. ISBN: 0-87335-201-7, 121–134
- Vásquez M, Espejo RT** 1997: *Chemolithotrophic bacteria in copper ores leached at high sulfuric acid concentration.* Appl Environ Microbiol 1997, 63:332-334.
- WANG Jun, ZHU Shan, ZHANG Yansheng, ZHAO Hongbo, HU Minghao, YANG Congren, QIN Wenqing, QIU Guanzhou,**2014.*Biobleaching of low grade copper sulfide ores by Acidithiobacillus ferrooxidans and Acidithiobacillus thiooxidans.* J. Cent. South Univ. 21: 728–734.
- Weir D.R. and Berezowsky M.G.S.** 1984. *Gold Extraction from refractory concentrates.* Research Report, Sheritt Research Centre, For Sakatchewan Alberta Canada, pp.1-26.



## PLAN DE TRABAJO PARA EL AISLAMIENTO BIOLOGICO

- 1) El aislamiento e identificación de las bacterias lixiviantes han formado parte del proyecto “Aislamiento de bacterias acidofilas a partir del drenaje ácido proveniente de las inmediaciones a las unidades mineras de Julcani y Recuperada , Huancavelica” (Vladimir Arias A., Carlos Rodríguez V., Pablo Ramírez R. 2012) el cual se ha validado de acuerdo a siguiente diseño experimental
  - 1.1) Toma de muestras de drenajes ácidos emitidos por labores mineras con alta presencia de metales disueltos.
  - 1.2) Aislamiento y generación del consorcio microbiano de organismos acidòfilos mediante concentración progresiva en medio líquido.
  - 1.3) Selección de la cepa bacteriana *Acidithiobacillus Ferroxidans* en medio sólido, por morfología de las colonias.
  - 1.4) Siembra de las colonias aisladas como *Acidithiobacillus Ferroxidans* en medio líquido.
  - 1.5) Caracterización morfológica de la bacteria aislada mediante tinción gram y observación microscópica.
  - 1.6) Caracterización del crecimiento bacteriano por velocidad de oxidación y conteo manual de población bacteriana frente a la variación de PH y concentración de sulfato de hierro. (Vladimir Arias A., Carlos Rodríguez V., Pablo Ramírez R. UNMSM-2012).

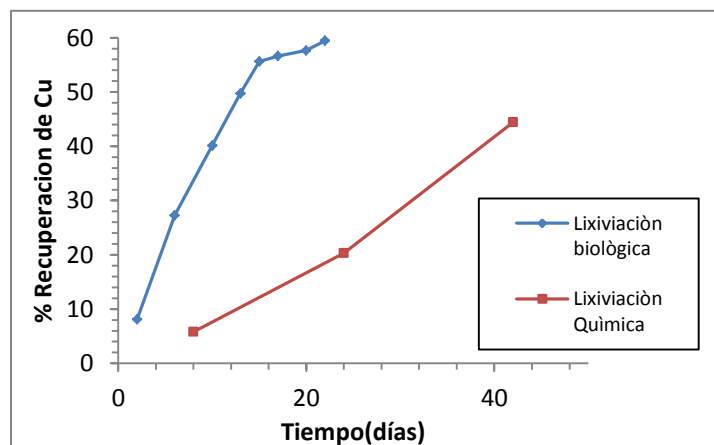
## LIXIVIACIÓN QUÍMICA

### Pruebas de Lixiviación Química.

Las pruebas de lixiviación química han sido realizados para cada mineral a 1%(W/V) y 2%(W/V) de densidad de pulpa, a condiciones de PH 1.5 (acondicionada con Ácido sulfúrico) , los análisis realizados en estas pruebas han sido el porcentaje de recuperación de Cobre para posterior comparación con la lixiviación biológica.

### Lixiviación Química al mineral S.

El porcentaje de recuperación de cobre para el mineral S, se muestra en las siguientes figuras.

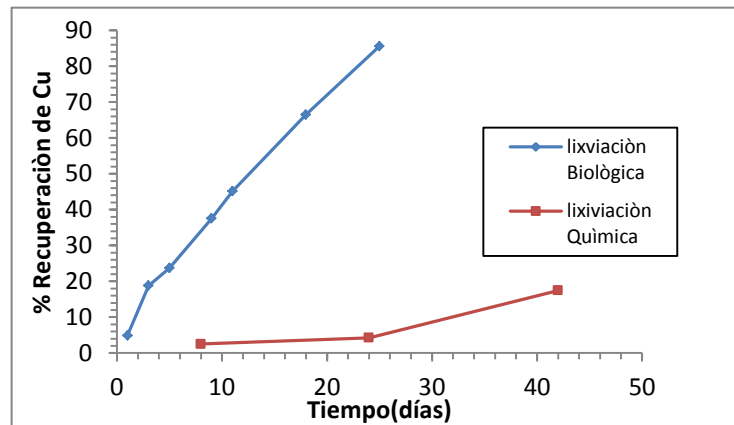


**Figura 9.1** Porcentaje de recuperación de cobre para el mineral S con lixiviación biológica y lixiviación química, a 1%(W/V) de densidad de pulpa.

La lixiviación biológica es a 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  correspondiente a la primera etapa. La lixiviación química ha sido acondicionada con ácido sulfúrico

concentrado hasta un PH de 1.7 y mantenida durante todo el proceso de lixiviación.

En la figura 9.1 se observa que la recuperación máxima en la lixiviación química es de 44.42% en 42 días, mientras la lixiviación biológica registra la misma recuperación de cobre en solo 12 días.



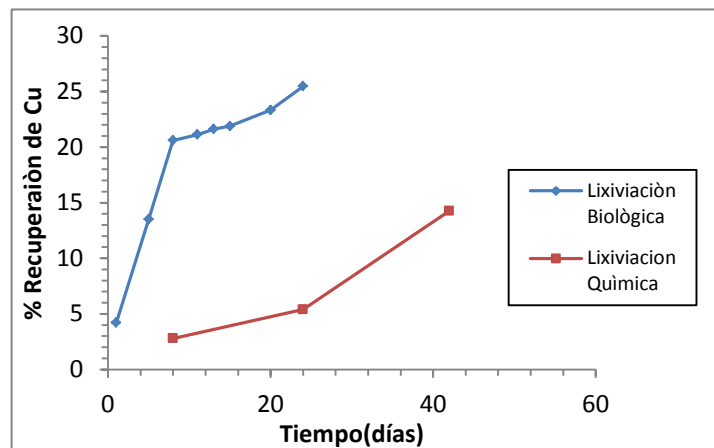
**Figura 9.2 Porcentaje de recuperación de cobre para el mineral S con lixiviación biológica y lixiviación química, a 2%(W/V) de densidad de pulpa.**

La lixiviación biológica es a 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  correspondiente a la segunda etapa. Al duplicar la densidad de pulpa el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación química disminuye respecto a la primera etapa, la recuperación máxima sido de 17% en los 42 días, mientras la lixiviación biológica se ha registrado una recuperación máxima de 85.5% en 25 días.

### **Lixiviación Química al mineral K.**

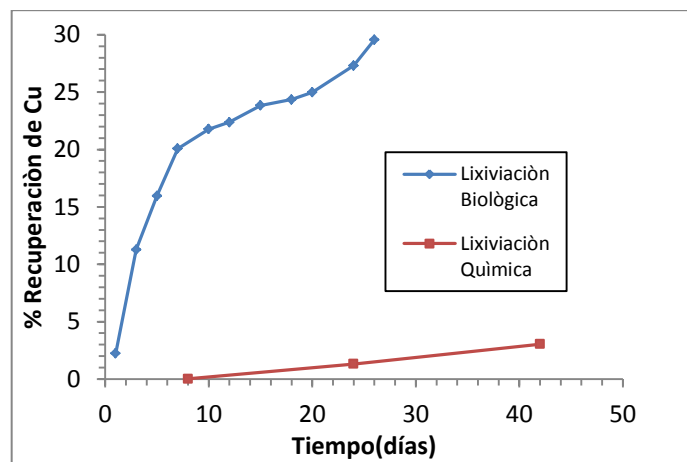
El porcentaje de recuperación de cobre para el mineral S, se muestra en las siguientes figuras.





**Figura 9.3 Porcentaje de recuperación de cobre para el mineral K con lixiviación biológica y lixiviación química, a 1%(W/V) de densidad de pulpa.**

En la figura 9.3 se observa que la recuperación máxima en la lixiviación química es de 14.27% en 42 días, mientras la lixiviación biológica registra la misma recuperación de cobre en 6 días, en comparación al mineral S la recuperación es 70.9% menos, en la lixiviación química.



**Figura 9.4 Porcentaje de recuperación de cobre para el mineral K con lixiviación biológica y lixiviación química, a 2%(W/V) de densidad de pulpa.**

La lixiviación biológica es a 0g/l de  $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  correspondiente a la segunda etapa de mineral K. Al duplicar la densidad de pulpa el porcentaje de recuperación de cobre en la lixiviación química ha disminuido de 14.27% a 3.04% respecto a la primera etapa, la recuperación máxima en la lixiviación química sido de 3.04% en los 42 días, mientras la lixiviación biológica se ha registrado una recuperación máxima de 29.5% en 26 días.